



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**RYCHLOSTNÍ SOUČinitele PLYNOVÝCH
TRYSEK NÍZKOEMISNÍHO HOŘÁKU**

DISCHARGE COEFFICIENTS FOR NOZZLES OF A LOW-NOX GAS BURNER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Barbora Zifčáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Juřena, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Studentka: **Barbora Zifčáková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Juřena, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Rychlostní součinitele plynových trysek nízkoemisního hořáku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při návrhu nových typů nízkoemisních hořáků hraje důležitou roli mimo jiné rychlostní součinitel plynové trysky, který vyjadřuje účinnost přeměny tlakové energie plynného paliva na kinetickou danou výtokovou rychlostí plynu. Součinitel se používá při dimenzování trysky ke korekci teoretické výtokové rychlosti. Pro určení součinitele bude proveden CFD výpočet proudění tryskou reálného výkonového nízkoemisního hořáku v software Ansys Fluent.

Důležitá poznámka:

Veškeré další informace a upřesnění údajů včetně grafických interpretací naleznete na webových stránkách <http://upi.fme.vutbr.cz/studium/temata-bakalarskych-praci> nebo přímo u garanta zadání, který Vám vše rád osobně vysvětlí.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Formulace vztahů pro výpočet teoretické rychlosti.
- 2) Vyladění modelu proudění tryskou na referenční geometrii, pro kterou rychlostní součinitele jsou známy.
- 3) Tvorba geometrie a výpočtové sítě pro další vybrané trysky nízkoemisního hořáku.
- 4) Simulace proudění vybranými tryskami.
- 5) Stanovení výtokových součinitelů pro vybrané trysky.

Seznam doporučené literatury:

BAUKAL, C.E., ed. Industrial Burners Handbook. CRC Press, 2004. 808 s. ISBN 978-0-8493-1386-8

ŠKORPÍK, J. Transformační technologie [online]. [cit. 26.10.2018]. Dostupné z:

<http://www.transformacni-technologie.cz/>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Anotace

Mezi základní komponenty nízkoemisních hořáků patří palivové trysky, jejichž funkcí je distribuce paliva do spalovací komory. Jedním z ukazatelů kvality trysky je tzv. rychlostní součinitel, který vyjadřuje, s jakou účinností dokáže tryska přeměnit tlakovou energii paliva na energii kinetickou, jež je daná výtokovou rychlostí plynu.

Tématem závěrečné práce bylo zjišťovat tyto rychlostní součinitele s využitím počítačového modelování proudění ve studentské verzi programu Ansys Fluent. Výpočet byl vyladěn na referenční geometrii a následně aplikován na další geometrie trysek, přičemž tyto geometrie byly jak rovinné, tak prostorové. Výsledky jsou srovnány s dostupnými experimentálními daty.

Mezi hlavní přínosy této práce patří především porovnání dvou metod pro modelování proudění (Scalable Wall Function a Enhanced Wall Treatment) a vytvoření metodiky výpočtu pro úlohy tohoto typu. Výsledky prezentované v této práci mohou být využity pro další studium plynových trysek jak z pohledu výpočtového, tak experimentálního.

Klíčová slova

Trysky, rychlostní součinitel, CFD, turbulentní proudění, nízkoemisní hořák

Abstract

Nozzles belong to the main parts of a low- NO_x gas burner. Their purpose is to transport fuel into a combustion system. One way of judging a quality of a nozzle is to define its discharge coefficient. It expresses an efficiency of energy conversion – from pressure to kinetic energy. In this thesis the discharge coefficients of several nozzles were established, using Ansys Fluent software for computer simulation. A calculation was tuned to a reference geometry and then applied to other geometries of nozzles, which were both planar and spatial. Numerically obtained data were compared with experimental data.

The benefits of this thesis are comparism of two main methods of flow modelling (Scalable Wall Function and Enhanced Wall Treatment) and formulation of a calculation methodology for this type of physical problem. The results provided by this thesis might be used for both another study and experimental research.

Key words

Nozzles, discharge coefficient, CFD, turbulent flow, low- NO_x burner

ZIFČÁKOVÁ, Barbora. *Rychlostní součinitele plynových trysek nízkoemisního hořáku*.
Brno, 2019. 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního
inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Tomáš Juřena, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma *Rychlostní součinitele plynových trysek nízkoemisního hořáku* vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Tomáše Juřeny, Ph.D. a s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 24. 5. 2019

.....

Barbora Zifčáková

Tímto bych ráda poděkovala všem, kteří mi byli během tvorby mé bakalářské práce nápomocni. Jmenovitě především vedoucímu mé práce, Ing. Tomáši Juřenovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, připomínky a především za opravdovou snahu a ochotu danou problematiku vysvětlit a pomoci s každým technickým problémem, který se během tvorby mé práce vyskytl.

Obsah

Úvod	15
1 Teoretická část	16
1.1 Proudění plynů a par tryskami	16
1.1.1 Režimy proudění	16
1.1.2 Základní předpoklady a rovnice	17
1.1.3 Rychlost zvuku	19
1.1.4 Vratné izoentropické proudění plynu v tryskách.....	19
1.1.5 Průběhy rychlostí a tlaků v konvergentních tryskách.....	21
1.1.6 Nevratné adiabatické proudění plynů v tryskách	22
2 CFD modelování	24
2.1 Referenční geometrie. Teoretický výpočet	24
2.2 Geometrie.....	26
2.3 Mesh.....	29
2.3.1 Mezní vrstva	30
2.3.2 Tvorba výpočtové sítě pro 2D model	32
2.3.3 Tvorba výpočtové sítě pro 3D model	34
2.4 Nastavení výpočtu.....	34
2.5 Výsledky modelového výpočtu	36
2.5.1 Simulace 2D trysky	36
2.5.2 Simulace 3D trysky	38
2.5.3 Porovnání rychlostních součinitelů modelové trysky.....	39
3 Výsledky numerických simulací	41
3.1 Tryska 1	42
3.2 Tryska 2	44
3.3 Tryska 3	46
3.4 Tryska 4	48
3.5 Tryska 5	51
3.6 Srovnání rychlostních součinitelů.....	55
4 Diskuze	56
Závěr.....	60
Seznam použitých zdrojů.....	63
Seznam použitých symbolů a zkratk	65
Seznam obrázků.....	67
Seznam tabulek.....	68

Úvod

Plynové hořáky jsou nedílnou komponentou v procesním průmyslu. Jejich úkolem je přeměňovat chemickou energii na energii tepelnou a jejich konstrukce závisí především na typu technologické aplikace. Jako součást palivových soustav se tak objevují v nejrozličnějších odvětvích procesního průmyslu, od rafinace, přes biotechnologie až po petrochemický průmysl.

Stěžejním prvkem všech hořáků jsou palivové trysky. Jejich účelem je správná distribuce paliva do spalovací soustavy – musí se tak dít s předepsaným průtokem kontinuálně, s vhodnou výtokovou rychlostí rovnoměrně a bez kolísání, neboť tyto jevy ovlivňují spalovací proces a mají velký vliv na délku, tvar a stabilitu plamene a na tvorbu emisí dusíku (NO_x). Požadavky na kvalitu trysek jsou tedy velmi vysoké a během návrhu spalovacího procesu je na ně kladen velký důraz.

Při proudění plynu tryskami dochází k disipaci energie, tedy ke ztrátám. Zhodnocení kvality trysky spočívá v posouzení, jakou měrou tyto ztráty ovlivní průtok plynu, rychlost jeho výtoku či změnu energie. Ukazatelem míry odlišnosti mezi reálnou a teoretickou rychlostí plynu na výstupu z trysky je *rychlostní součinitel*, jenž je zároveň hlavním předmětem této bakalářské práce.

V první, teoretické, části práce je uveden nezbytný teoretický základ pro pochopení problematiky proudění plynů v tryskách a formulaci vztahů pro teoretickou výtokovou rychlost a rychlostní součinitel.

Druhá kapitola uvádí výpočet tabelované trysky. Jedná se především o teoretický výpočet výstupních rychlostí, postup nastavení modelu a jeho vyladění na referenční geometrii. Výsledky těchto výpočtů pak sloužily jako odrazový můstek pro simulace dalších trysek.

V poslední kapitole jsou uvedeny výsledky všech simulací a jejich srovnání buď s tabelovanými, nebo předloženými experimentálními daty.

1 Teoretická část

Při studiu plynových hořáků se dominantně zabýváme termodynamickým jevem zvaným proudění plynů a par. Tento jev je nedílnou součástí mnoha jiných odvětví procesního průmyslu – lze se s ním setkat v energetice, při návrhu tepelných výměníků, v chemickém, dokonce potravinářském průmyslu.

Tryska, často také nazývaná zužující se dýza, je část hořáku, která se využívá k přeměně tlakové energie v tekutině na energii kinetickou – žádaným výsledkem je tedy zvýšení rychlosti média ve výstupním průřezu [1]. Tohoto efektu se dosahuje správným návrhem jednak geometrie trysky (především změnami průtočného průřezu), jednak podmínek, za kterých bude pracovat.

1.1 Proudění plynů a par tryskami

Proudění v tryskách hořáků spadá do vědního oboru aerohydraulika, neboť transportním médiem je stlačitelná tekutina, jako je vzduch, metan aj. V médiu dochází k velkým změnám rychlostí, je tedy nutno při výpočtu termodynamického stavu plynu uvažovat i vliv kinetické energie – nebude tedy záviset jen na stavových veličinách¹ plynu, nýbrž i na jeho rychlosti.

Proudění v technických zařízeních je obecně trojrozměrné, na inženýrské úrovni jej ovšem s výhodou nahrazujeme jednorozměrnými, případně dvojrozměrnými modely – tedy přístupy jednoduššími a výpočtově méně náročnými, avšak dostatečně přesnými k tomu, aby podaly základní informace o studovaném problému. V dalším textu jsou uvedeny sady základních pojmů, rovnic a zákonů, které jsou důležité ve vztahu k řešené problematice.

1.1.1 Režimy proudění

Pohyb tekutiny je jev mnohem složitější, než je tomu u pevných látek. Přitažlivé síly mezi částicemi tekutiny jsou řádově daleko nižší než u pevných látek, což umožňuje neuspořádaný pohyb těchto částic. Převažuje-li pohyb tekutiny v jednom směru, hovoříme o proudění.

Podle pohybu částic v proudu rozlišujeme proudění:

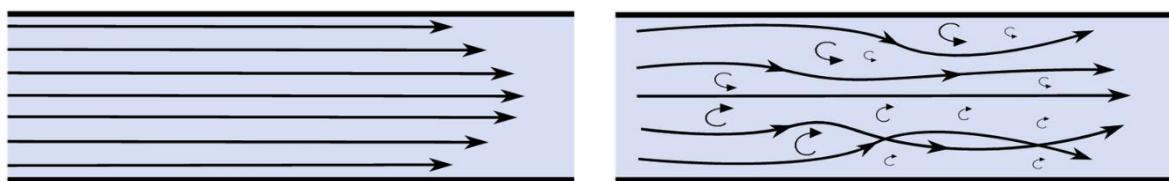
- laminární
- turbulentní

Laminární proudění se vyznačuje tím, že se jednotlivé částice pohybují ve vláknech (po vrstvách). Tato vlákna se nesmějí vzájemně křížit, tedy částice nemůže přecházet z jednoho vlákna do druhého.

Při vyšších rychlostech se laminární proudění stává nestabilním, částice si vzájemně předávají hybnost a pohybují se napříč zmíněnými vrstvami. Nastává proudění **turbulentní**, prostorový jev, jehož důsledkem jsou mimo jiné fluktuace jednotlivých veličin.

¹ Mezi *stavové veličiny* plynu patří tlak p [Pa], objem V [m³] a teplota T [K]. Je-li rychlost plynu do 30 m/s, pak změny kinetické a potenciální energie nemají vliv na termodynamický stav plynu – mluvíme o termodynamickém stavu klidného plynu, který je jednoznačně určen stavovými veličinami [2].

Oba režimy proudění jsou znázorněny na Obr. 1.



Obr. 1 Profil proudění laminárního (vlevo) a turbulentního (vpravo), převzato z [3], upraveno

O charakteru proudění rozhoduje kritická hodnota *Reynoldsova čísla*. Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina definovaná vztahem

$$Re = \frac{w_s * d}{\nu}, \quad (1.1)$$

w_s [m/s] je střední rychlost proudu,

d [m] je charakteristický rozměr²,

ν [m²/s] je kinematická viskozita.

Kritická hodnota Reynoldsova čísla se různí v závislosti na geometrii a typu média, neexistuje tedy pevně daná hodnota, která by určovala přechod z laminárního proudění na turbulentní³. Z rovnice (1.1) je zřejmé, že s rostoucí rychlostí proudění roste i Reynoldsovo číslo. Vysoké hodnoty Reynoldsova čísla značí turbulentní proudění.

Vzhledem k vysokým rychlostem je v tryskách proudění turbulentní. Tomuto faktu bude potřeba přizpůsobit výběr vhodných turbulentních modelů pro CFD simulace, viz kapitolu 2.4.

1.1.2 Základní předpoklady a rovnice

Při výpočtech trysek se předpokládá, že proudění je:

- Jednorozměrné
- Adiabatické
- Izoentropické
- Spojité

Jelikož plyn prochází relativně krátkou tryskou velkou rychlostí, nedochází téměř ke sdílení tepla s okolím a proudění lze považovat za adiabatické. Rovněž ztráty třením v krátkých dýzách jsou velmi malé, proto lze změnu entropie zanedbat. Všechny parametry proudu se mění pozvolna a bez skokových změn, z toho důvodu se proudění uvažuje jako spojité [4].

Základními rovnicemi pro řešení proudění v tryskách jsou:

- Rovnice kontinuity
- Rovnice energetická

² Charakteristickým rozměrem konkrétně u trysek je hydraulický průměr, který je roven poměru čtyřnásobku vnitřního průřezu profilu a smáčeného obvodu.

³ Například pro rovné potrubí je kritická hodnota $Re = 2320$. Do této hodnoty je proudění čistě laminární, po překročení kritické hodnoty se začínají projevovat první znaky turbulentního chování.

Rovnice kontinuity je vyjádřením zákona zachování hmotnosti. Platí

$$\dot{m} = \frac{Sw}{v} = Sw\rho = \text{konst.} \quad (1.2)$$

což lze po tzv. logaritmické derivaci vyjádřit ve tvaru

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dw}{w} + \frac{dS}{S} = 0, \quad (1.3)$$

\dot{m} [kg/s] je hmotnostní tok,

S [m²] průtočný průřez,

w [m/s] rychlost proudění,

v [m³/kg] měrný objem,

ρ [kg/m³] hustota tekutiny.

Rovnice energetická je formulací zákona zachování energie. Lze ji odvodit z prvního zákona termodynamiky pro otevřené soustavy

$$dq = di + \frac{dw^2}{2} + gdh + da_t, \quad (1.4)$$

jenž vyjadřuje rovnováhu mezi energií tepelnou (vnitřní), kinetickou a potenciální. V tryskách konají plyny expanzi pouze objemovou práci, užitečná technická práce je nulová ($da_t = 0$). Pak za předpokladu adiabatického proudění ($dq = 0$) a při zanedbání změny potenciální energie ($gdh = 0$) dostaneme integrací rovnice (1.4) energetickou rovnici ve tvaru

$$i + \frac{w^2}{2} = \text{konst.} \quad (1.5)$$

kde i [J/kg] je měrná entalpie [4].

Z uvedeného vyplývá, že změna energie je způsobena pouze změnou rychlosti. Bude-li rychlost beze změny, nezmění se ani teplota [2].

1.1.3 Rychlost zvuku

Rychlost zvuku představuje rychlost šíření malých tlakových rozruchů tekutinou a je důležitou veličinou, která rozhoduje o tom, jakým způsobem se bude proudění v tryskách vyvíjet [1]. Pro izoentropické proudění je popsána vztahem

$$a = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} = \sqrt{\kappa r T} = \sqrt{\kappa p v}, \quad (1.6)$$

a [m/s] je rychlost zvuku,
 κ [-] Poissonova konstanta⁴,
 r [J/kgK] měrná plynová konstanta.

Z uvedené rovnice vyplývá, že rychlost zvuku je závislá na vlastnostech prostředí, v němž se tlakové vlny šíří. Pro dvě různá prostředí jsou tedy i rychlosti zvuku jiné. Z toho důvodu hovoříme o místní rychlosti zvuku.

Ukazatelem toho, jak moc se rychlost proudění přibližuje místní rychlosti zvuku, je bezrozměrné **Machovo číslo**

$$Ma = \frac{w}{a}. \quad (1.7)$$

Při $Ma < 1$ se jedná o proudění podzvukové, pro $Ma > 1$ o proudění nadzvukové.

1.1.4 Vratné izoentropické proudění plynu v tryskách

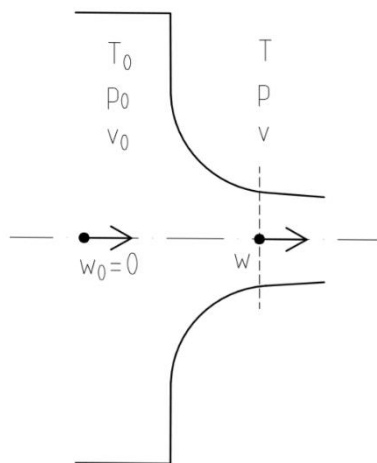
Pro proudění stlačitelných tekutin jsou důležité dva stavy plynu:

- Stav klidový (stagnační)
- Stav kritický

Klidovým stavem plynu (index 0) označujeme takový stav, jehož bychom dosáhli izoentropickým, tedy ideálním zabrzděním proudícího plynu na nulovou rychlost [1]. Tomuto popisu odpovídá například stav plynu v uzavřené nádobě. **Kritický stav** (index *) je naopak takový stav, v němž rychlost proudění je stejně velká jako rychlost zvuku v daném prostředí, tedy $Ma = 1$.

⁴ Poissonova konstanta je bezrozměrná veličina vyjadřující poměr měrné tepelné kapacity plynu za konstantního tlaku C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$] a měrné tepelné kapacity plynu za konstantního objemu C_v [$\frac{J}{kg \cdot K}$].

Na Obr. 2 je znázorněn výtok plynu konvergentní tryskou z nádoby.



Obr. 2 Výtok plynu konvergentní tryskou, převzato z [5], upraveno

Pro výpočet výstupní rychlosti plynu v obecném místě trysky vyjdeme z rovnice (1.5), tedy

$$i_0 + \frac{w_0^2}{2} = i + \frac{w^2}{2} \quad (1.8)$$

Jelikož je plyn v nádobě v klidovém stavu, platí $w_0 = 0$ a rovnice (1.8) má po úpravě tvar

$$w = \sqrt{2(i_0 - i)} \quad (1.9)$$

Dosazením rovnic adiabatického proudění, vztahů mezi stavovými veličinami a dalšími úpravami dostaneme rovnici (1.9) pro výstupní rychlost plynu ve tvaru

$$w = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_0 v_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}. \quad (1.10)$$

Tato rovnice se označuje jako **Saint Vénantova-Wentzelova rovnice**. Jak je ze vztahu patrné, výstupní rychlost plynu je závislá na typu plynu, jeho klidových veličinách a dominantně na tlakovém spádu⁵.

⁵ Ve výrazu pro tlakový spád udávají vstupní tlak (p_0) i výstupní tlak (p) hodnoty absolutního tlaku.

1.1.5 Průběhy rychlostí a tlaků v konvergentních tryskách

Pro konvergentní trysku platí, že proudění v ní je podzvukové, nejvýše rovné rychlosti zvuku v daném prostředí a této maximální (kritické) rychlosti nabývá vždy ve výstupním průměru, který je zároveň průměrem nejužším [5].

Určující veličinou pro výstupní rychlost z trysky je **tlakový poměr** definovaný

$$\beta = \frac{p}{p_0}. \quad (1.11)$$

Ten říká, zda je daný tlakový spád schopný urychlit proudění na rychlost zvuku v daném prostředí.

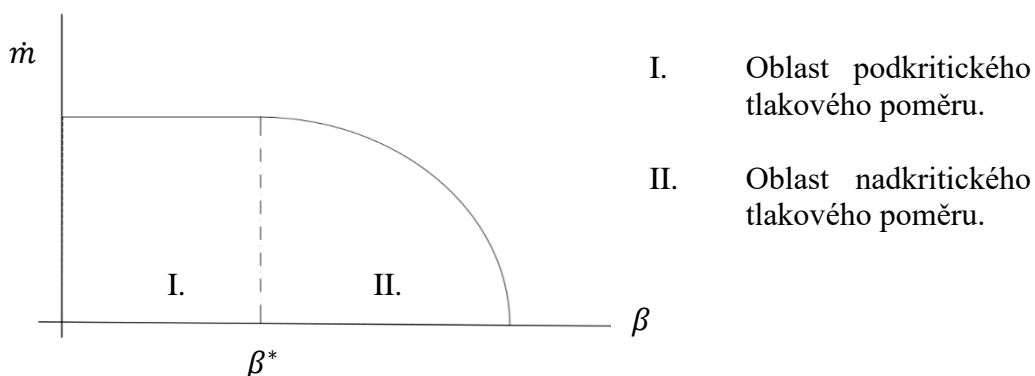
Plyn bude mít rychlost zvuku při **kritickém tlakovém poměru**

$$\beta^* = \frac{p^*}{p_0} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (1.12)$$

Z uvedeného vyplývá, že na výstupu z trysky, tedy v jejím nejužším průřezu, bude pro $\beta > \beta^*$ proudění podkritické (nabývá hodnot nižších než rychlost zvuku), pro $\beta = \beta^*$ bude mít proudění právě rychlost zvuku. Pro $\beta < \beta^*$ bude výstupní rychlost stále stejná a rovna rychlosti zvuku. Tento jev se nazývá zahlcením (ucpáním) trysky a kvůli energii nahromaděné velkým snižováním tlakového poměru je výtok z trysky doprovázen rázovými vlnami⁶ [1].

Uvedený popis se vztahuje ke konvergentním tryskám. Prodlouží-li se konvergentní tryska divergentním (rozšiřujícím se) nátrubkem, vznikne tzv. Lavalova dýza. Ta je schopna zpracovat i tlakový poměr, který je nižší než kritický. Za nejužším místem trysky rychlost tedy dále roste až na hodnoty nadkritické (nadzvukové).

Vzhledem k rovnici (1.2) platí uvedené závislosti i pro hmotnostní průtok \dot{m} . Na Obr. 3 jsou tyto závislosti graficky znázorněny.



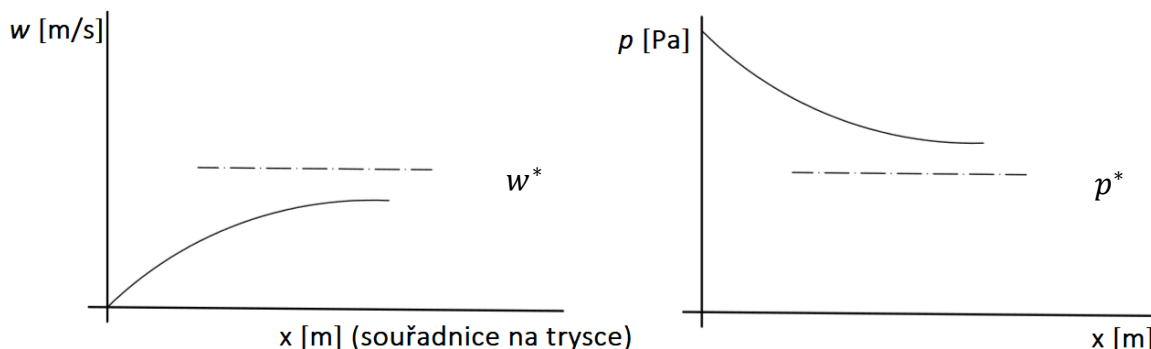
Obr. 3 Závislost hmotnostního toku na poměru tlaků, převzato z [5], upraveno

⁶ Rázové vlny jsou složité útvary způsobené tlakovými rozruchy, které se vytvářejí v okamžiku přechodu proudění z podzvukového na nadzvukové. Při průchodu rázovou vlnou se skokově mění parametry proudu – dochází tedy k energetickým ztrátám a nárůstu entropie. Za rázovou vlnou je rychlost proudu vždy nižší než rychlost zvuku v daném prostředí [6].

Průběhy rychlostí a tlaků podél trysky lze odvodit z **pohybové rovnice**. Ta je u izoentropického proudění totožná s rovnicí energetickou (1.5) a v diferenciální podobě má tvar

$$vdp + wdw = 0. \quad (1.13)$$

Jelikož reálné hodnoty měrného objemu v a rychlosti w jsou vždy kladné, budou sledované průběhy záviset na znaménku změny rychlosti a tlaku (dw a dp). Z rovnice (1.13) jasně vyplývá, že tato znaménka budou vždy vzájemně opačná. Z tohoto důvodu jsou i průběhy rychlostí a tlaků podél trysky vzájemně „zrcadlově“ opačné, jak je znázorněno na Obr. 4 [5].



Obr. 4 Průběhy rychlostí a tlaků v konvergentní trysce, převzato z [5], upraveno

1.1.6 Nevratné adiabatické proudění plynů v tryskách

Dosud bylo proudění uvažováno jako izoentropické, beze ztrát. Plyny a páry jsou ale viskózní tekutiny, takže ve skutečnosti při proudění vždy dochází k disipaci energie. Dominantně se tak děje vlivem tlakových ztrát (ty jsou důsledkem třecích sil, jež konají nevratnou práci), turbulencí v měnícím se průřezu a odtrhávání mezní vrstvy⁷. Vzhledem k malé délce trysek nejsou odchylky od ideálního proudění příliš významné – nedochází ke sdílení tepla s okolím. Děj je proto možno uvažovat jako adiabatický ($dq = 0$), nicméně měrná entropie média roste ($ds > 0$) [2].

Pro proudění se ztrátami platí stejné zákonitosti jako pro izoentropické proudění. Vlivem přijatého tepla však v rovnici (1.8) měrná entalpie i na výstupu z trysky roste [2]. Při stejném počátečním a výstupním tlaku bude tedy dle rovnice (1.9) skutečná výtoková rychlost menší než u ideálního, izoentropického proudění.

Mírou rozdílu teoretické a skutečné výtokové rychlosti je **rychlostní součinitel** φ definovaný

$$\varphi = \frac{w'}{w}, \quad (1.14)$$

w' [m/s] je skutečná výtoková rychlost,
 w [m/s] teoretická výtoková rychlost.

⁷ Problematika mezní vrstvy bude dále rozebrána v praktické části (kapitola 2.3.1) v souvislosti s výběrem turbulentního modelu.

Skutečná výtoková rychlost tedy nezávisí pouze na typu plynu, jeho stavu a tlakovém spádu, jak rovnice (1.10) udává. Vzhledem ke ztrátám hraje velmi významnou roli i materiál a povrch trysky. Velmi důležitý je také tvar trysky – ta by se měla plynule zužovat tak, aby se nárazově neměnil směr proudění a nedocházelo tak ke zbytečným turbulencím a ztrátám [6]. Správně navržená tryska je dle [7] s $\varphi > 0,9$. Je tedy nutné navrhnout ideální tvar, správné zúžení, vrcholový úhel, úhel vrtání, materiál a provozní podmínky tak, aby se co nejvíce eliminovaly ztráty třením, a tedy i tlakové ztráty.

2 CFD modelování

Ačkoliv rychlostní součinitelé patří mezi základní kritéria posouzení účinnosti a kvality trysky, rozsáhlejší databázi, v níž by byly geometrie trysek s příslušnými rychlostními součiniteli přehledně uspořádány, by člověk hledal marně. Tento fakt je dosti pochopitelný – trysky různých geometrií mají různé rychlostní součinitele a jejich zjišťování je tak časově i finančně velmi náročné.

Hlavním cílem této práce je namodelovat proudění plynů v tryskách různých geometrií pomocí výpočtové dynamiky tekutin – CFD (Computational Fluid Dynamics) – a zjistit tak hodnoty jejich rychlostních součinitelů.

CFD představuje souhrn metod, pomocí nichž lze řešit problémy nejen z oblasti proudění tekutin, nýbrž i přenosu tepla, chemických procesů, radiace aj. Fyzikální zákony proudění viskózní (reálné) tekutiny jsou popsány pomocí Navierových – Stokesových rovnic. Jedná se o parciální diferenciální rovnice, jejichž analytické řešení je možné pouze za velmi zjednodušujících a prakticky omezujících předpokladů. Z toho důvodu jsou řešeny numerickými metodami, z nichž v oblasti CFD výpočtů převládá metoda konečných objemů.

Základem této metody je rozdělit těleso (fluidní doménu) na malé části – kontrolní objemy, nebo-li buňky. Potřebné diferenciální rovnice jsou numericky řešeny v centrálních bodech těchto buněk a výsledky ze všech buněk pak dohromady podávají informaci o chování celého studovaného systému.

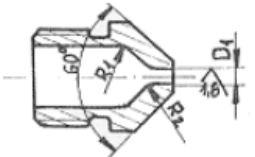
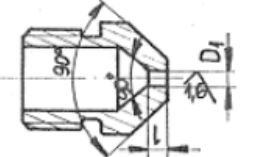
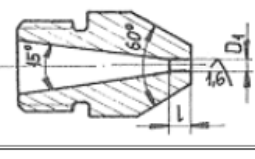
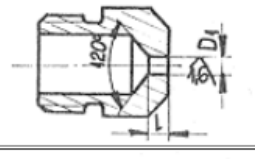
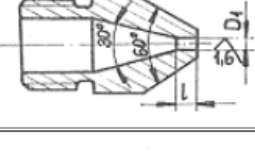

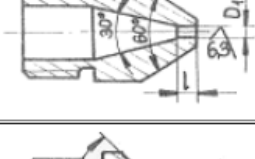
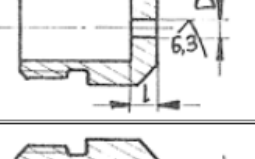

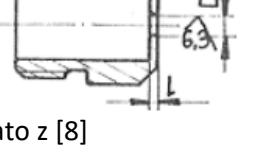
V dnešní době existuje mnoho počítačových programů, v nichž jsou metody CFD implementovány. Jedním z nejznámějších je program ANSYS Fluent, který zaštiťuje celou škálu možností simulací fyzikálních pochodů a je tak nedílnou součástí mnoha inženýrských výpočtů.

Simulace proudění v této práci se týkala celkem šesti trysek. Pro simulaci byla použita studentská verze programu ANSYS Fluent. Ta poskytuje všechny funkce jako plná verze, jediným omezením je počet elementů. Zatímco v plné verzi žádné takové omezení není, studentská verze má horní hranici elementů 512 000.

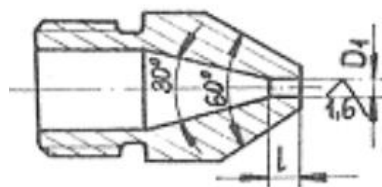
2.1 Referenční geometrie. Teoretický výpočet

Ačkoliv se počítané trysky lišily geometrií, případně provozními podmínkami, řešené fyzikální procesy spočívaly na stejném principu, byly tedy v zásadě stejné. V první fázi práce byl tedy výpočet vyladěn na referenční geometrii, načež se tento model aplikoval na zbylé geometrie.

Přestože bylo uvedeno, že se rychlostní součinitele netabelují, Josef Fík ve své publikaci *Spalování plyných paliv a plynové hořáky* [7] uvádí hodnoty rychlostních součinitelů deseti různých trysek, viz Obr. 5. Pro vyladění modelu na referenční geometrii sloužila tryska s rychlostním součinitelem $\varphi = 0,92$, viz Obr. 6. Tryska byla vzhledem ke své rotační symetrii modelována jednak jako 2D, jednak jako 3D těleso.

Tvar plynové trysky	l/D_1	Rychlostní součinitel plynové trysky φ	Tvar plynové trysky	l/D_1	Rychlostní součinitel plynové trysky φ
	$R_1=R_2=D_1$	0,97		1,5	0,9
	1,5	0,94		1,5	0,89
	1,5	0,92		1,5	0,87
	1,5	0,91		1,5	0,82
	1,5	0,905		0,5	0,75

Obr. 5 Tabulka rychlostních součinitelů, převzato z [8]



Obr. 6 Modelová tryska, převzato z [8] a upraveno

Výstupní rychlost byla počítána podle vztahu (1.10). Poissonova konstanta κ , absolutní tlaky na vstupu (p_0) a výstupu (p) a měrný objem v_0 (což je převrácená hodnota hustoty) jsou dány vlastnostmi proudícího média a konkrétními provozními podmínkami. Zadané a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Údaje pro výpočet trysky.

Specifika výpočtu	
Médium	metan
Poissonova konstanta [-]	1,303
Hustota [kg/m ³]	0,668
Měrný objem [m ³ /kg]	1,497
Tlak na výstupu [Pa]	101 325

Hodnota přetlaku ⁸ [Pa]	Teoretická výstupní rychlost w [m/s]
1 500	67,21
2 000	77,68
4 000	110,26
5 000	123,49
10 000	176,17
30 000	314,60
50 000	416,57
70 000	503,64

2.2 Geometrie

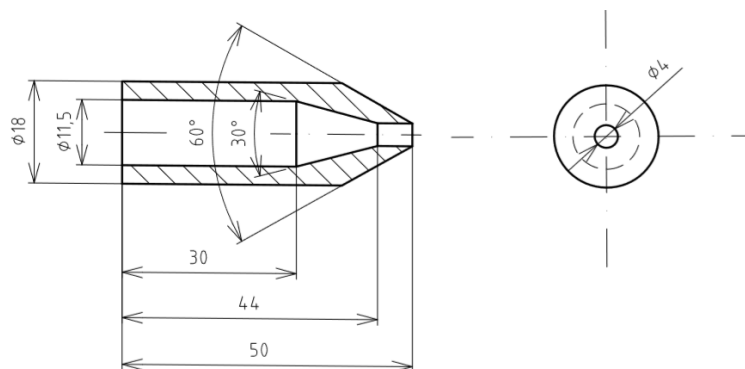
První fází tvorby modelu pro výpočet bylo vytvoření geometrie tělesa, na němž byla následně vytvořena výpočtová síť pro numerickou simulaci. Ansys má ve Workbench zabudované dva programy na vytváření geometrie – ANSYS SpaceClaim a Ansys DesignModeler. Další možností je vytvořit geometrii v jiném CAD - software a následně ji do Workbench importovat.

Geometrie pro 2D těleso byla vytvářena v programu ANSYS SpaceClaim, pro 3D model v programu Autodesk Inventor.

Dle Obr. 6 jsou důležitými rozměry pouze průměr a ústí trysky. Pro zvolenou trysku bylo počítáno s průměrem $D = 4$ mm, délka ústí je pak $L = 6$ mm.

Požadavky na zbylé rozměry nejsou specifikovány, byly proto volně zvoleny. Volba rozměrů se opírala o komerčně vyráběné trysky a trysky, které jsou dále řešeny v této práci. Geometrie zvolené trysky je znázorněna na Obr. 7.

⁸ Tabulka udává hodnoty přetlaků. Ve vzorci pro výstupní rychlost je tedy hodnota tlaku na vstupu p_0 rovna součtu tlaku okolí p a daného přetlaku.



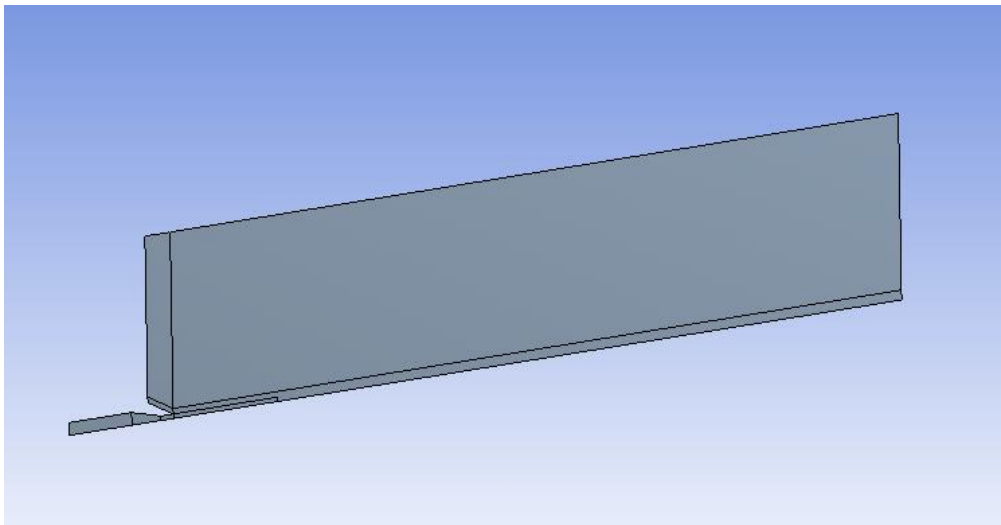
Obr. 7 Geometrie modelové trysky

Tab. 2 Parametry modelové trysky.

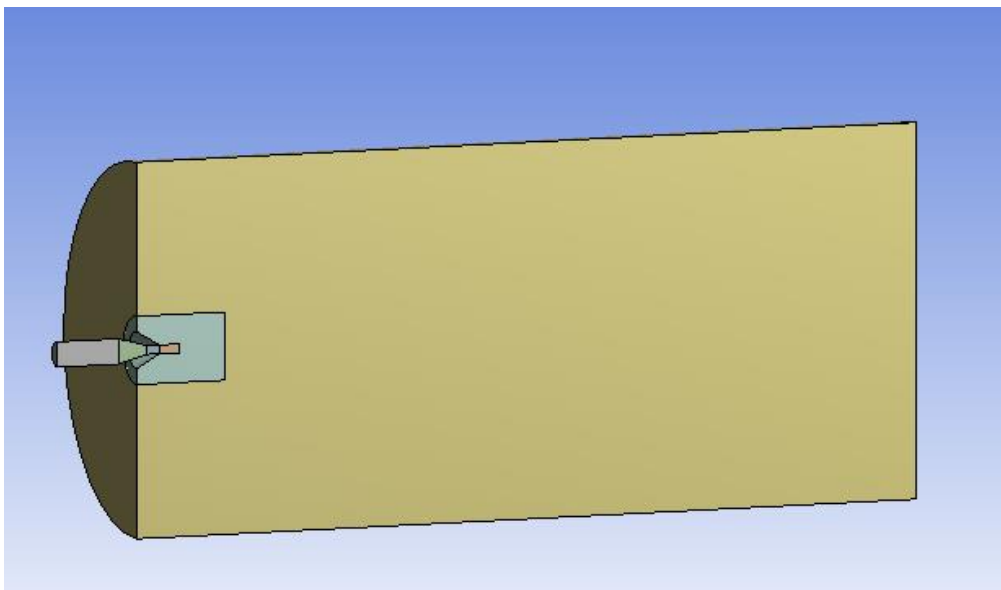
Počet otvorů	Umístění otvoru	Průměr otvoru [mm]	Kuželovitost povrchu trysky [°]	Kuželovitost vnitřku trysky [°]
1	V ose trysky	4	60	30

Ačkoliv ve skutečnosti médium z trysky vytéká do volného prostoru, pro účely simulací bylo potřeba za ústím trysky vytvořit dostatečně velkou ohraničenou doménu. Tato doména jednak slouží k vykreslení profilu, s nímž plyn z trysky vytéká, jednak k tomu, aby bylo co nejlépe simulováno okolní prostředí. Rozměry domény musí být natolik velké, aby bylo možno vyloučit vliv její hranice na tok média, a tedy ovlivnění výsledků. Rychlost i dostřiková vzdálenost vytékajícího plynu se s rostoucím přetlakem zvyšují, je tedy důležité zajistit natolik dlouhou doménu, aby byl plyn dostatečně zbrzděn okolím. Nedostatečně velká doména má jednak vliv na stabilitu výpočtu, jednak zapříčiňuje vznik zpětného toku. U modelové trysky se několika simulacemi testoval vliv délky domény, a tedy zpětného toku, na výsledek – bylo zjištěno, že výsledek varioval v řádu desetin procent, tedy zanedbatelně, nicméně při vyšším výskytu zpětného toku hrozí horší a pomalejší konvergence. Z toho důvodu byla snaha zpětný tok maximálně eliminovat. Zároveň však doména musela být rozumně velká s ohledem na dříve zmíněný limit počtu buněk. Délka domény byla proto zvolena dvacetinásobkem průměru trysky (což odpovídá sedminásobku její délky), průměr pětadvacetkrát větší než průměr ústí trysky.

Při simulacích nebyly změny materiálu trysky vlivem proudění, případně přenosu tepla, předmětem zájmu. Z toho důvodu byl modelován pouze vnitřek trysky – tedy prostor, v němž proudí médium. Zároveň bylo využito rotační symetrie trysky a tedy možnosti modelovat pouze polovinu tělesa, což významně ovlivňuje výpočetní čas i náročnost. Geometrie byly podle potřeby různě rozděleny, čehož je využito u vytváření sítě – v jednotlivých částech je pak možno vytvořit různě jemnou síť. Ukázky modelovaných těles jsou na obrázcích níže. Model pro 2D těleso je znázorněn na Obr. 8., pro 3D na Obr. 9.



Obr. 8 2D model trysky

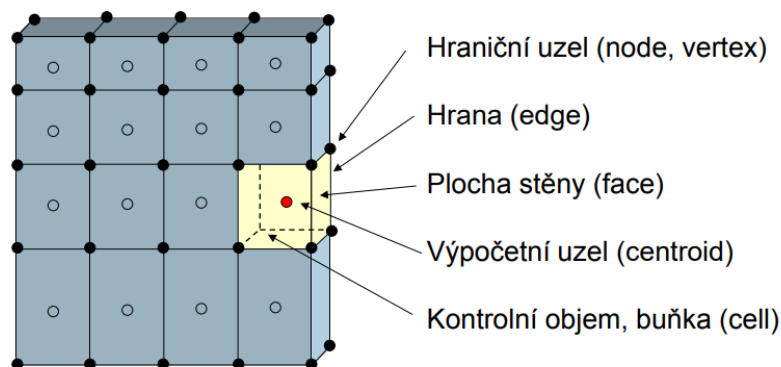


Obr. 9 3D model trysky

2.3 Mesh

Říká se, že tvorba výpočtové sítě je vědní disciplína sama o sobě. Není divu, neboť vytvoření kvalitní výpočtové sítě – *Mesh* – je absolutním základem pro správné výpočtové modelování pomocí CFD.

Vytvoření výpočtové sítě znamená rozdělit těleso na malé oblasti – buňky, které jsou reprezentovány souborem geometrických entit, jak je znázorněno na Obr. 10. Každá buňka má uzlové body, v nichž probíhá výpočet.



Obr. 10 Schéma struktury výpočetní sítě, převzato z [9]

Podle typu buněk lze provést základní rozdělení sítě.

Pro 2D modely jsou to sítě s prvky

- Trojúhelníkovými (Triangles)
- Čtyřúhelníkovými (Quadrilaterals)

Pro 3D modely s prvky

- Čtyřstěny (Tetrahedrals)
- Pětistěny (Prisms)
- Jehlany (Pyramids)
- Šestistěny (Hexahedrals)
- Mnohostěny (Polyhedrals)

Obecně platí, že při dobré kvalitě elementů jsou výhodnější čtyřúhelníky a šestistěny, případně mnohostěny. Jsou-li tyto buňky orientovány ve směru proudění, eliminuje se tím vliv numerické difuze⁹ v ostatních (kolmých) směrech a výpočet vede k přesnějším výsledkům [10] a rychlejší konvergenci.

⁹ Numerická difuze je označení chyby, která vzniká při nepřesné interpolaci hodnot na hranicích elementů [11]. Tu ovlivňuje jak orientace sítě vzhledem k proudění, tak diskretizační schémata nízkého řádu, např. upwind prvního řádu [10].

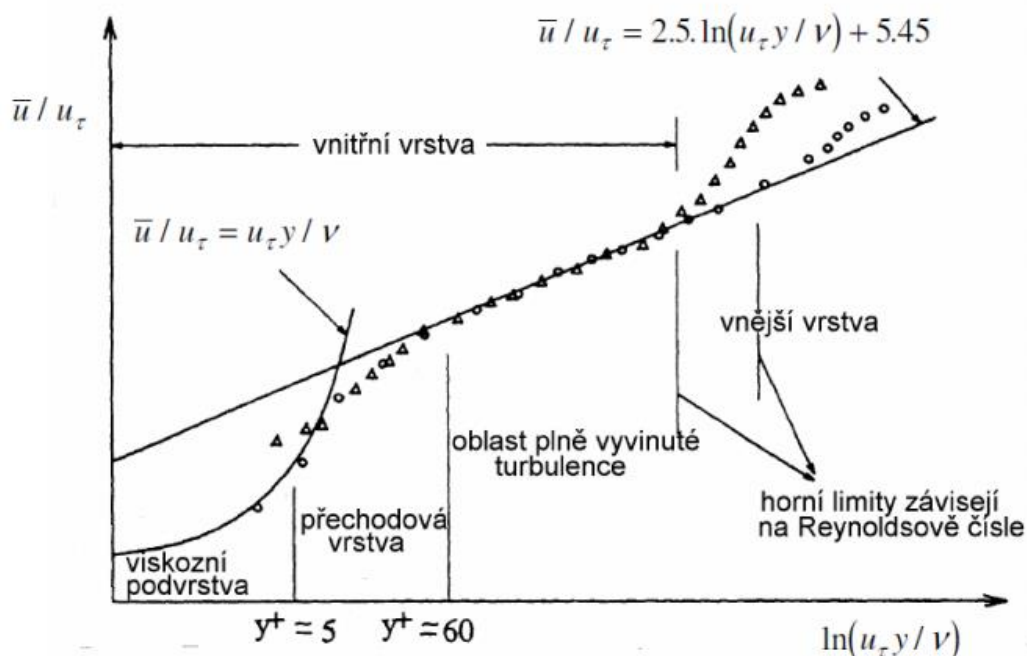
Kvalitou elementů se rozumí takové vlastnosti, které zajistí dobrou konvergenci a povedou ke správným výsledkům. Hlavními faktory k posouzení kvality sítě jsou:

- *Element Quality*, který vyjadřuje, jak jsou buňky odlišné od čtverce, či krychle. Rozsah je od nuly do jedné. Průměrná kvalita elementů by měla převyšovat hodnotu 0,3.
- *Orthogonal Quality*, tedy míra kolmosti centroidů ke hranám či stěnám. Rozsah je od nuly do jedné, kdy jedna znamená nejlepší kvalitu.
- *Skewness*, neboli zkosení hran nebo stěn. Vyjadřuje, jak moc se buňky liší od ideálního (rovnoměrného) tvaru (tedy čtyřúhelník od čtverce, trojúhelník od rovnostranného trojúhelníku atd.). Vhodné průměrné hodnoty se pohybují v rozmezí 0-0,25. Maximální hodnota nesmí překročit 0,9.
- *Aspect Ratio*, což v překladu znamená poměr stran, tedy šířky/délky elementu. Hodnoty blízké jedné jsou nejlepší, příliš vysoké hodnoty mohou komplikovat konvergenci a přesnost výpočtu. Výjimkou jsou buňky v okolí mezní vrstvy [12].

2.3.1 Mezní vrstva

Turbulence je prostorový jev, jehož důsledkem jsou mimo jiné fluktuace jednotlivých veličin. U výpočtového modelování turbulentního proudění má významný vliv na tvorbu sítě tenká oblast na povrchu obtékaného tělesa, tzv. **mezní vrstva**. Kvůli viskozitě média zde dochází k rapidní změně rychlostí – od nuly v místě povrchu tělesa až do rychlosti volného proudu na vnější hranici mezní vrstvy [4].

Mezní vrstva se klasicky dělí na tři podvrstvy, což je schematicky znázorněno na Obr. 11.



Obr. 11 Rozložení mezní vrstvy, převzato z [12], upraveno

Viskozí podvrstva se nachází v bezprostřední blízkosti stěny. Převládá zde vliv molekulární viskozity μ , která je charakteristikou proudícího média a vyjadřuje odpor částic tekutiny proti pohybu vlivem třecích sil.

Tento odpor je vyjádřen tečným napětím, definovaným Newtonovým zákonem viskozity

$$\tau = \mu \frac{dv}{dn},$$

kde τ [Pa] je tečné napětí,

μ [Pa · s] dynamická viskozita,

v [m/s] rychlost média,

n [-] normála obtékaného povrchu.

Proudění v této podvrstvě je tedy téměř laminární [13].

Podvrstva nejblíže volnému proudu se nazývá *plně turbulentní podvrstva*, v níž turbulence hraje zásadní roli. Mezi těmito vrstvami se nachází *přechodová vrstva*, kde se srovnatelnou měrou uplatňují účinky jak molekulové viskozity, tak turbulence.

Hodnota y^+

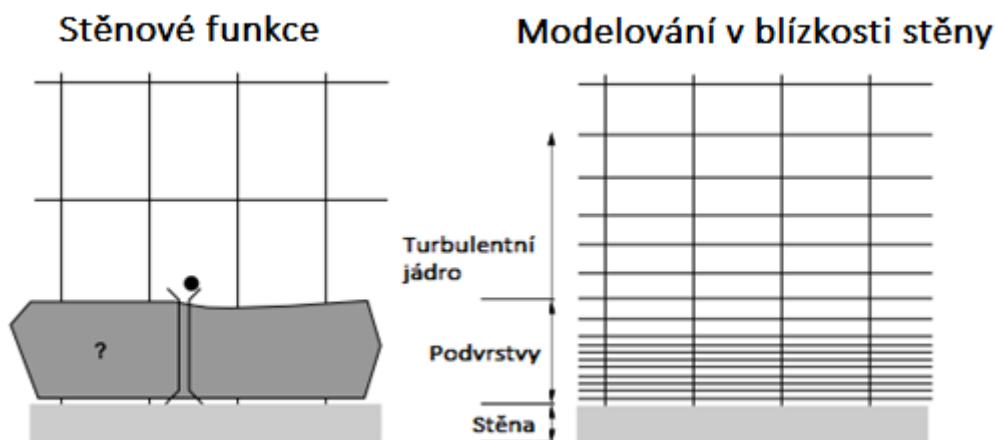
Obr. 11 dále znázorňuje závislost bezrozměrné rychlosti a rozložení podvrstev mezní vrstvy na hodnotě y^+ . Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která udává vzdálenost mezi stěnou a geometrickým středem první buňky, tzv. *centroidem*, viz Obr. 10. Její velikost závisí na skutečné vzdálenosti centroidu od stěny, smykové rychlosti, hustotě a kinematické viskozitě. Hodnota y^+ je stěžejní informací při výběru modelů turbulence, a to zejména s ohledem na modelování jevů v blízkosti stěn. Jelikož nelze hodnotu y^+ zjistit apriori, prakticky se její hodnota zjišťuje iteračně. Na základě odhadu její velikosti dle parametrů volného proudu se při vytváření sítě navrhne velikost první buňky, spustí výpočet a následně se kontroluje hodnota y^+ vzhledem ke zvolenému turbulentnímu modelu. V případě nedostatků se před dalším výpočtem mění parametry sítě.

Výpočet mezní vrstvy v ANSYS Fluent

ANSYS Fluent v zásadě nabízí dva způsoby, kterými lze řešit proudění v blízkosti stěn. Jsou to:

- Wall Functions (stěnové funkce)
- Near-Wall Modelling (modelování proudění v blízkosti stěny)

Oba tyto způsoby jsou schematicky znázorněny na Obr. 12.



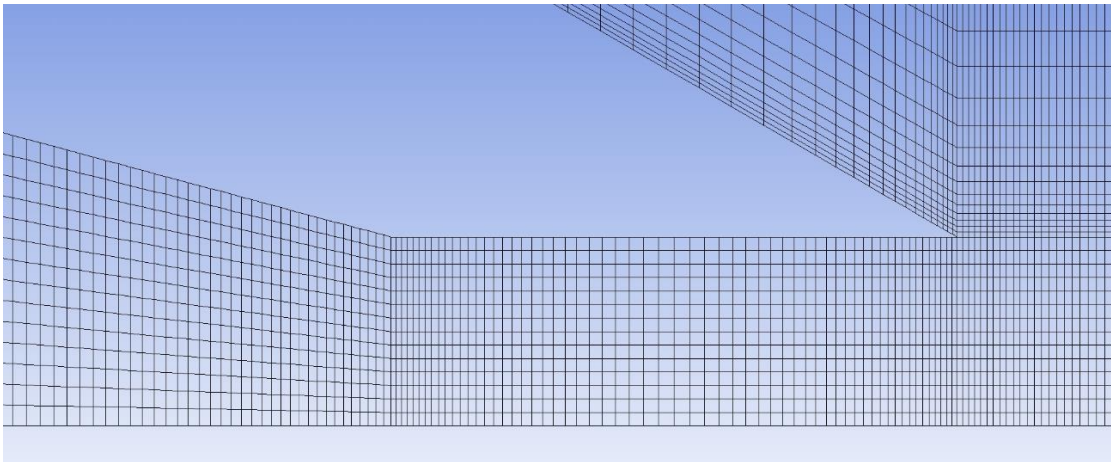
Obr. 12 Schémata řešení proudění v blízkosti stěn, převzato z [12], upraveno

Stěnové funkce jsou označení pro soubor semi-empirických vztahů, které řeší proudění v blízkosti stěny. Pomocí těchto funkcí je možné překlenout oblast laminární podvrstvy a přechodové vrstvy, neřeší se tedy oblasti s dominantním vlivem molekulové viskozity, a proto je síť v okolí stěny poněkud hrubá. Tím je možné velmi snížit počet buněk, výpočtový čas i náročnost, ovšem na úkor přesnosti predikce jevů v blízkosti stěny, které hrají roli např. v simulacích přestupu tepla a hmoty mezi tekutinou a stěnou. Dle [12] jsou doporučované hodnoty y^+ v intervalu $< 30; 300 >$.

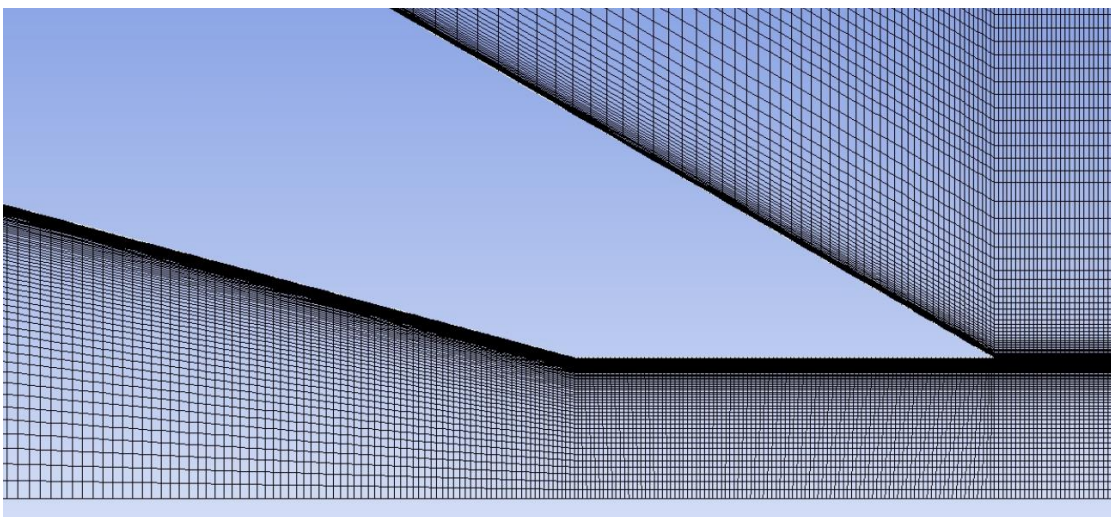
Druhým způsobem je udělat síť v oblasti stěny natolik jemnou, aby bylo zaručeno, že bude dostatečně popsána i oblast laminární podvrstvy. Žádanými hodnotami jsou $y^+ \approx 1$ (případně menší), za přijatelnou mezní hodnotu je obvykle považováno $y^+ \approx 4$ [12]. Dále je důležité, aby byla mezní vrstva pokryta dostatečným počtem buněk.

2.3.2 Tvorba výpočtové sítě pro 2D model

Výpočetní síť byla vytvářena pomocí Ansys Meshing v prostředí Ansys Workbench. Vzhledem k poměrně jednoduché geometrii bylo možno vytvořit na celém tělese strukturovanou (pravidelnou) síť tvořenou prvky *Quads*. Tohoto bylo dosaženo především nástrojem *Mapped Face Meshing*. Podél stěn trysky byl pomocí funkce *Edge Sizing* s využitím *Bias Factor* předepisován počet elementů. Tím byla zajištěna dostatečná jemnost sítě v místech největších gradientů měřených veličin – především v oblasti ústí a stěn trysky a v místech změny průřezu trysky. V prostoru za tryskou byla, opět pomocí funkce *Sizing*, nastavena velikost elementů a rychlost jejich růstu směrem od ústí. Síť byla vytvářena jak pro metodu stěnových funkcí (viz Obr. 13), tak pro modely proudění v blízkosti stěny (Obr. 14).



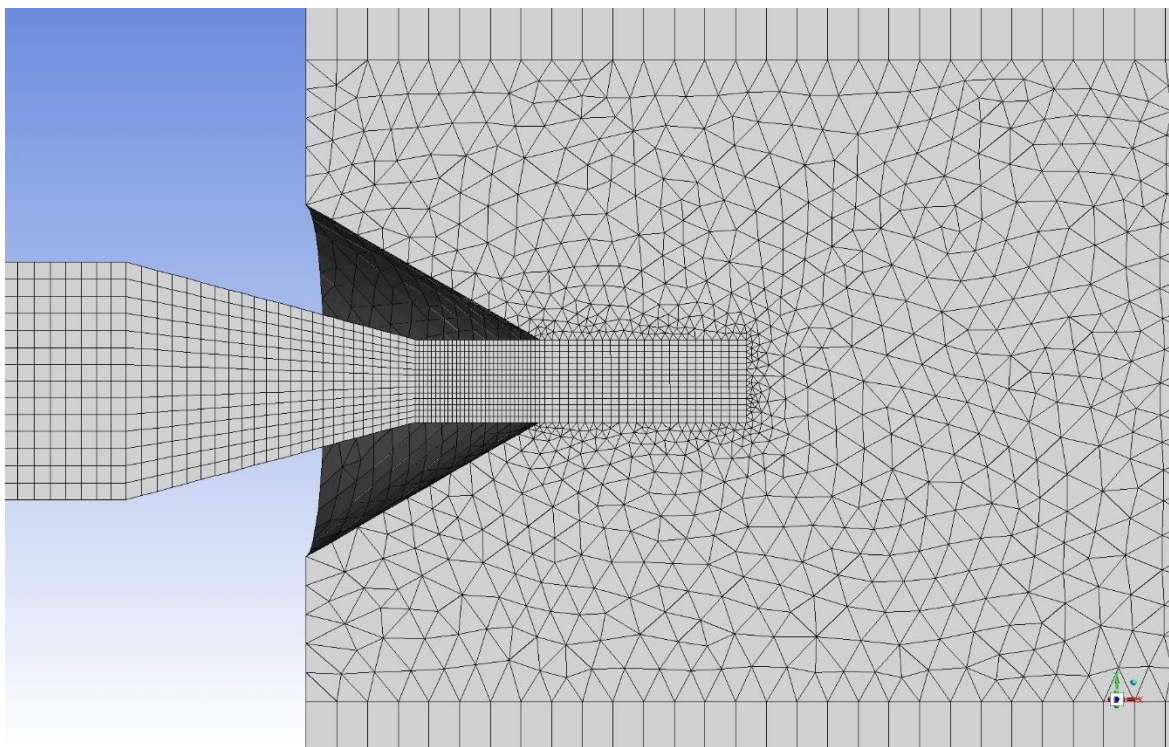
Obr. 13 Detail sítě v oblasti ústí trysky pro metodu stěnových funkcí



Obr. 14 Detail sítě v oblasti ústí trysky pro metodu modelování v blízkosti stěny

2.3.3 Tvorba výpočtové sítě pro 3D model

Výpočtová síť byla vytvářena pomocí stejného programu (Ansys Meshing) jako v případě 2D modelu. Vzhledem k jednoduché a symetrické geometrii byla na tělese opět vytvořena především strukturovaná síť tvořená hexahedrálními elementy, pro rychlejší růst v doméně bylo využito tetrahedrálních buněk. Síť byla tentokrát vytvořena pouze pro metodu stěnových funkcí. Ukázka sítě je na Obr. 15.



Obr. 15 Detail sítě pro prostorový model trysky

2.4 Nastavení výpočtu

Po vytvoření sítě je nutné nastavit parametry výpočtu - ty jsou podrobně vypsány v Tab. 3. U ostatních trysek budou nastavení výpočtu stejná, rozdíly budou pouze v hodnotách přetlaků na vstupu do trysky (inletu), operačního tlaku, typu média a velikosti hydraulického průměru. Následující tabulka tedy nebude u každé trysky vypsána.

Konvergence výpočtu byla sledována pomocí monitorů reziduí¹⁰ a rychlosti na konci trysky. Hodnoty výstupních rychlostí se neměnily už při hodnotě reziduí 10^{-3} , přesto však byla tato defaultní hodnota ještě o dva řády snížena, tedy na 10^{-5} .

¹⁰ Rezidua jsou ukazateli nesplnění diskretizovaných rovnic vlivem iteračního numerického výpočtu na celé doméně, a tedy informují o konvergenci simulace. V ideálním případě by rezidua byla nulová, při numerickém výpočtu ovšem vždy k určité chybě dochází. Čím nižších hodnot rezidua nabývají, tím přesněji jsou splněny zákony zachování popsané řídicími rovnicemi.

Tab. 3 Nastavení výpočtu modelové trysky.

	2D model	3D model
Nastavení řešiče		
Typ	Pressure-based	
Čas	Steady (Pseudo transient)	
Timescale factor	1	
Modely výpočtu		
Model turbulence	Realizovatelný $k - \varepsilon$	
Stěnová funkce	Enhanced Wall Treatment	Scalable Wall Function
Další nastavení turbulentního modelu	Viscous Heat	
	Production Limiter	
Model přenosu energie	Aktivní	
Materiály		
Metan	Ideal-gas	
Okrajové podmínky		
Pressure Inlet	Specifikace	
	Přetlak [Pa]	1 500 – 70 000
	Hydraulický průměr [mm]	11,5
	Intenzita turbulence [%]	5
Pressure Outlet	Přetlak [Pa]	0
	Intenzita turbulence [%]	5
Wall	Pohyb stěny	Stationary Wall
	Tření	No Slip
	Drsnost	Standard
Axis/symmetry	-	
Operační podmínky		
Operační tlak [Pa]	101 325	
Metody výpočtu		
Schéma výpočtu	Coupled	
Gradient	Least Squares Cell-Based	
Tlak	Second Order	
Hustota	Second Order Upwind	
Hybnost	Third Order MUSCL	
Turbulentní kinetická energie	Second Order Upwind	
Turbulentní disipace	Second Order Upwind	
Energie	Second Order Upwind	
Další	High Order Term Relaxation	

2.5 Výsledky modelového výpočtu

V průběhu této podkapitoly budou srovnány výsledky výpočtu modelové trysky různými metodami a bude provedena diskuze o použití nejvhodnějšího postupu výpočtu pro další trysky.

2.5.1 Simulace 2D trysky

Následující tabulky (Tab. 4, Tab. 5, Tab. 6) ukazují hodnoty výstupních rychlostí při různých přetlácích, počítané pomocí Enhanced Wall Treatment (EWT) i Scalable Wall Function (SWF), a specifikace jednotlivých sítí. Záměrně není uvedena hodnota Aspect Ratio, neboť srovnávání nevyhnutelně vysokých hodnot u metody EWT se SWF by bylo nesmyslné a zbytečně zavádějící.

Tab. 4 Informace o výpočtové síti.

Informace o výpočtové síti	
Stěnová funkce	Enhanced Wall Treatment
Průměrná kvalita elementů	0,48
Průměrná šikmost	0,003
Průměrná hodnota ortogonality	0,99
Počet elementů	257 810
Stěnová funkce	Scalable Wall Function
Průměrná kvalita elementů	0,96
Průměrná šikmost	0,001
Průměrná hodnota ortogonality	0,99
Počet elementů	85 209

Tab. 5 Hodnoty výstupních rychlostí počítané metodou Enhanced Wall Treatment.

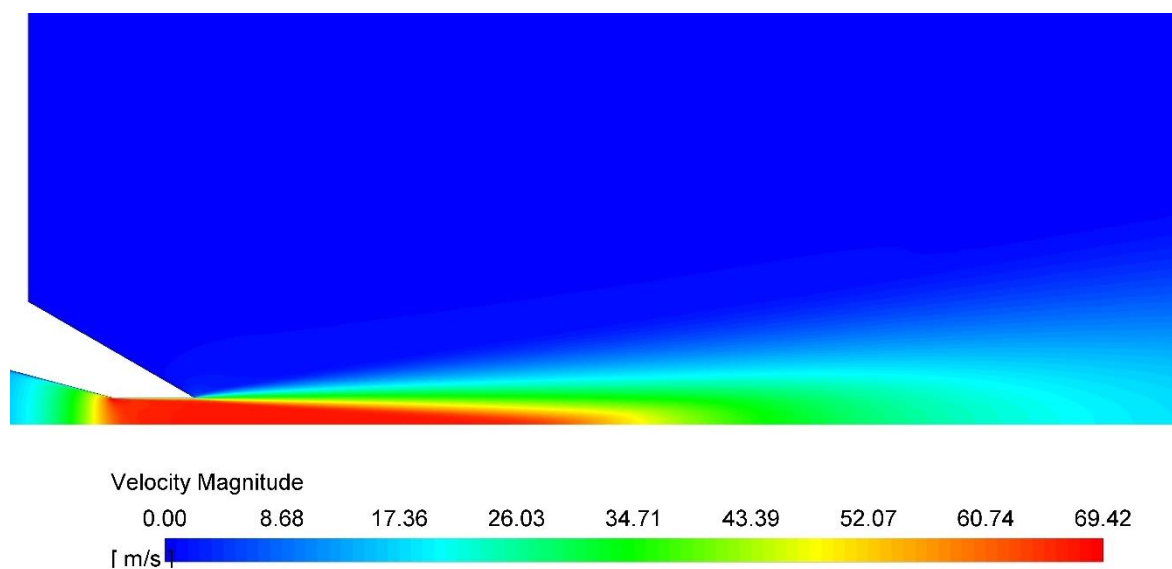
Enhanced Wall Treatment		
Přetlak [Pa]	Výstupní rychlost [m/s]	Hodnota y^+
1 500	64,37	0,53
5 000	117,48	0,75
30 000	272,05	1,12
70 000	383,13	1,92

Tab. 6 Hodnoty výstupních rychlostí počítané pomocí Scalable Wall Function.

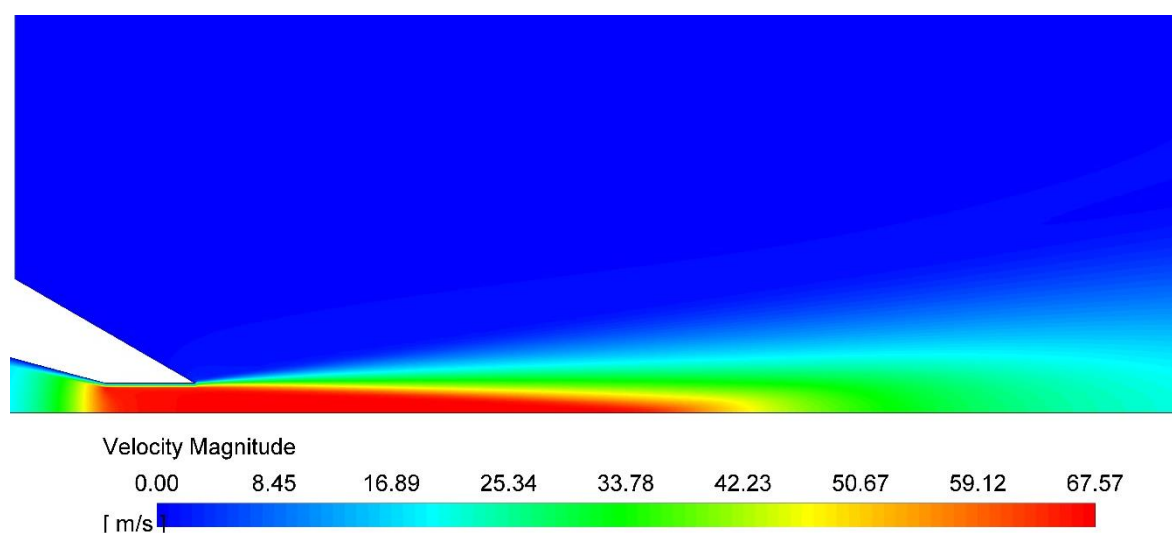
Scalable Wall Function		
Přetlak [Pa]	Výstupní rychlost [m/s]	Hodnota y^+
1500	64,93	21,23
5000	118,14	35,08
30000	271,69	40,50
70000	382,32	53,06

Maximální rozdíl výstupních rychlostí činí 0,56 %. Z toho vyplývá, že škálovatelné stěnové funkce poměrně dobře kopírují náročnější EWT. Z tabulek je navíc patrné, že použitím stěnových funkcí se počet buněk sníží až trojnásobně.

Následující obrázky (Obr. 16 a Obr. 17) ukazují kontury rychlostí počítané pomocí obou metod. Ty potvrzují, že metody EWT a SWF vedou při výpočtu těchto trysek na velmi podobné výsledky.



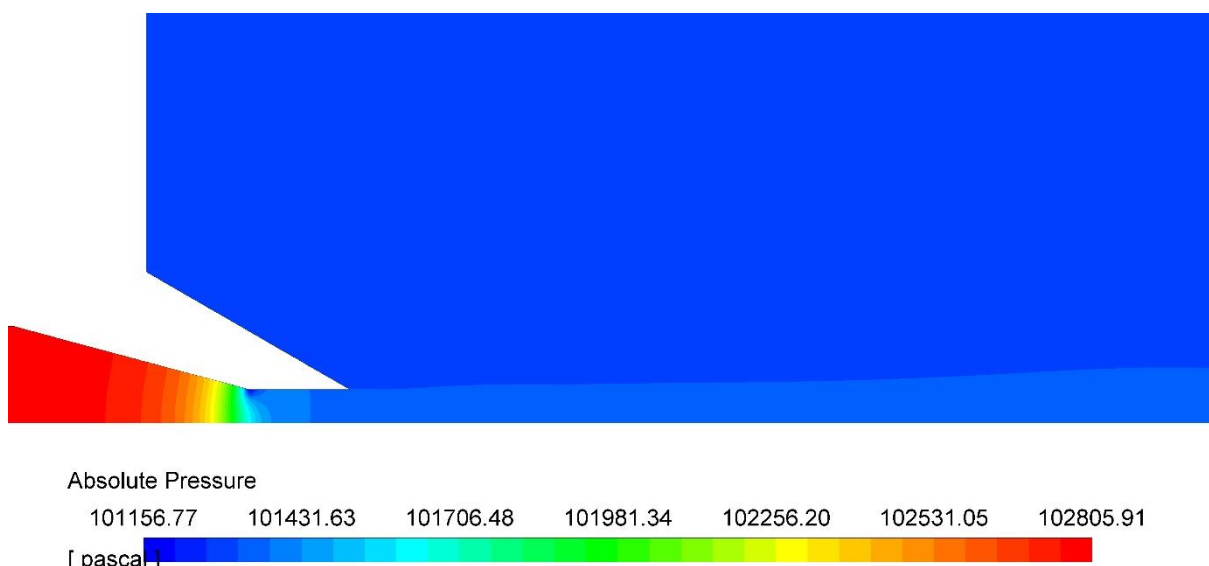
Obr. 16 Profil rychlosti pro přetlak 1 500 Pa a metodu EWT



Obr. 17 Profil rychlosti pro přetlak 1 500 Pa a metodu SWF

Se zvyšujícím se přetlakem roste i rychlost proudícího média, tloušťka mezní vrstvy tedy klesá. Z toho důvodu se hodnoty y^+ s rostoucím přetlakem zvyšují, přestože byly výpočty prováděny na stejně jemné síti. Hodnoty y^+ však leží v doporučených intervalech a z výsledků simulací jejich variování očividně nehraje zásadní roli.

V kapitole 1.1.5 bylo uvedeno, že průběhy rychlostí a tlaků podél trysky jsou vzájemně zrcadlově opačné. Rychlost podél trysky u konvergentních dýz roste, tlak musí tedy klesat. Tuto závislost potvrzuje Obr. 18.



Obr. 18 Profil tlaku pro přetlak 1 500 Pa

Dále byla v teoretické části práce uvedena pohybová rovnice (1.13). Integrací této rovnice podél osy trubice (trysky) a další úpravou získáme rovnici [2]

$$\frac{w^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{p}{\rho} = \text{konst.} \quad (2.1)$$

Ta umožňuje vypočítat teoretickou hodnotu tlaku na výstupu z trysky. Pro přetlak 1 500 Pa je teoretická hodnota tlaku 102 474 Pa, podle výpočtu ve Fluentu je tato hodnota 101 347 Pa. Tento výsledek je očekávaný – teoretický výpočet neuvažuje disipaci energie, tedy tlakové ztráty, proto je hodnota výstupního tlaku vyšší než numericky vypočítaná Fluentem.

Pro metodu SWF byl testován i vliv drsnosti stěn. Byly provedeny výpočty se specifikací drsnosti stěny trysky, ukázalo se však, že toto nastavení mělo na výsledky zanedbatelný vliv.

2.5.2 Simulace 3D trysky

V předchozím textu bylo uvedeno, že metody EWT a SWF jsou při řešení této problematiky zaměnitelné. Měla-li být dodržena horní hranice počtu elementů pro studentskou verzi Ansys Fluent, bylo nezbytné počítat 3D prostorové modely pomocí SWF. Síť byla vytvářena i pro metodu EWT, tím však byla tato hranice několikanásobně překročena. Výsledky této simulace jsou shrnuty v Tab. 7.

Tab. 7 Hodnoty výstupních rychlostí počítané pomocí SWF pro 3D model trysky.

Scalable Wall Function		
Přetlak [Pa]	Výstupní rychlost [m/s]	Hodnota y^+
1 500	64,55	22,49
2 000	74,68	25,40
4 000	105,37	34,03
5 000	117,58	37,41
10 000	164,13	50,11
30 000	271,34	79,23
50 000	335,12	97,31
70 000	381,27	111,17

2.5.3 Porovnání rychlostních součinitelů modelové trysky

V následující tabulce (Tab. 8) jsou vypsány výstupní rychlosti teoretické, vypočtené pomocí CFD a rychlostní součinitele 2D a 3D modelu. Dle předchozích kapitol je rovinný model počítán metodou EWT, prostorový pomocí SWF.

Hodnoty přetlaku byly počítány maximálně do 70 000 Pa. Vyšší hodnoty už by vedly k podkritickému tlakovému poměru, došlo by k zahlcení trysky a výkon hořáku už by se dále nezvyšoval. Z praktického hlediska tedy není důvod počítat s vyššími hodnotami přetlaku.

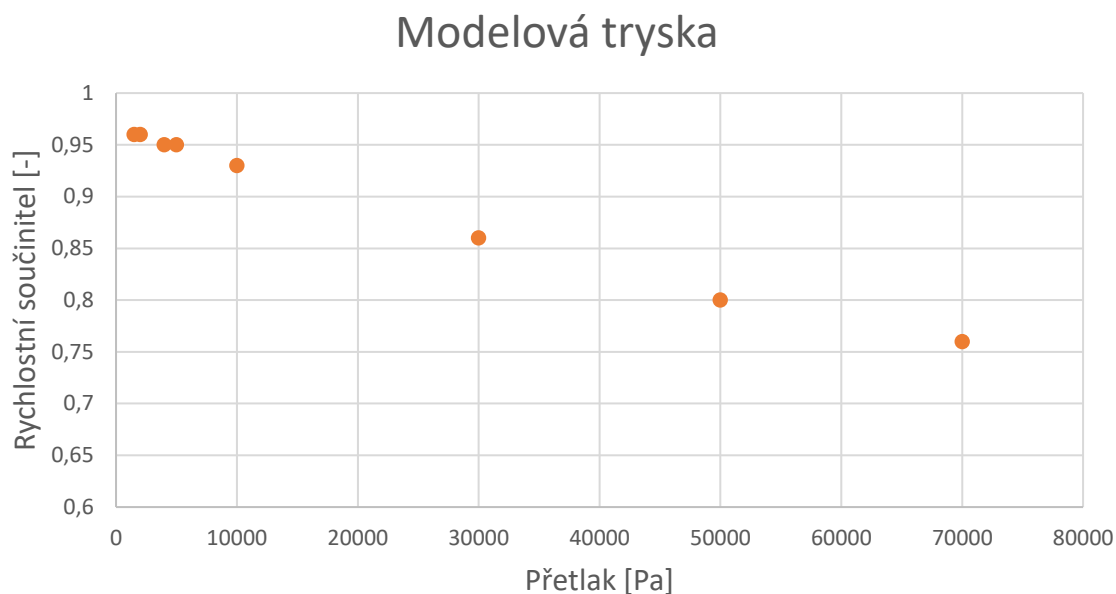
Tab. 8 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky.

Hodnota přetlaku [Pa]	w [m/s]	w_{2D} [m/s]	w_{3D} [m/s]	φ_{2D} [-]	φ_{3D} [-]
1 500	67,21	64,37	64,55	0,96	0,96
2 000	77,68	74,54	74,68	0,96	0,96
4 000	110,26	105,23	105,37	0,95	0,95
5 000	123,49	117,48	117,58	0,95	0,95
10 000	176,17	163,87	164,13	0,93	0,93
30 000	314,60	272,05	271,34	0,86	0,86
50 000	416,57	336,68	335,12	0,80	0,80
70 000	503,64	383,13	381,27	0,76	0,76

kde w [m/s] je teoretická výstupní rychlost, w_{2D} (w_{3D}) [m/s], jsou vypočtené rychlosti 2D (3D) modelu, φ_{2D} (φ_{3D}) [-] jsou rychlostní součinitele 2D (3D) modelu.

Výstupní rychlosti obou modelů se liší, nicméně tak zanedbatelně, že se tyto rozdíly na rychlostním součiniteli (s udávanou přesností na 2 desetinná místa) neprojeví. Z toho vyplývá, že zvolené metody jsou pro tuto úlohu adekvátní a zaměnitelné. Navíc lze výpočet rotačně symetrických trysek s dostatečnou přesností zjednodušit na rovinný problém.

Porovnáním výstupních rychlostí 2D a 3D modelu a s přihlédnutím k Tab. 7 lze navíc konstatovat, že při použití metody SWF je řešení nezávislé na hodnotě y^+ .



Obr. 19 Graf závislosti rychlostního součinitele na přetlaku pro modelovou trysku

Z grafu je patrné, že rychlostní součinitel klesá s rostoucím přetlakem. Uváděná tabelovaná hodnota rychlostního součinitele je 0,92 [7], nicméně výsledky simulací variují kolem této hodnoty v závislosti na velikosti přetlaku. Výstupní rychlost v tomto případě nelze považovat za indikátor správnosti numerického řešení, neboť při výpočtech nebyla známa přesná geometrie ani podmínky, za kterých byly trysky v publikaci Josefa Fíka [7] proměřeny.

Závěr pro další výpočty

Některé z trysek bylo potřeba počítat ve 3D, což neodvratně vedlo k velkému nárůstu buněk. Aby nedošlo k překročení povoleného počtu buněk u studentské verze ANSYS Fluent, bylo využito možnosti počítat pomocí stěnových funkcí. 2D modely byly tedy dále počítány pomocí náročnějšího modelu EWT, 3D modely naopak pomocí SWF.

3 Výsledky numerických simulací

V této bakalářské práci bylo propočítáno celkem pět trysek, které byly na Ústavu procesního inženýrství navrženy v rámci vývoje nízkoemisních hořáků. Čtyři z nich proměřila v rámci své závěrečné práce Lucie Ledererová [14]. Měření bylo provedeno pomocí žárové anemometrie ve Zkušebně hořáků na Ústavu procesního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Výstupní rychlosti byly zjišťovány celkem pro pět tlakových podmínek před tryskou. Hodnoty přetlaků byly 10 400 Pa, 20 400 Pa, 30 400 Pa, 40 400 Pa a 50 400 Pa. Naměřený tlak okolí během experimentu byl 99 600 Pa.

Vzhledem ke stejným operačním podmínkám jsou teoretické výstupní rychlosti všech trysek stejné. V dalším textu bude ke každé trysce uvedena tabulka se specifikací geometrie, s vypočtenými hodnotami sledovaných veličin, dále budou přiloženy příslušné grafické závislosti a kontury rychlostí, případně jiných veličin.

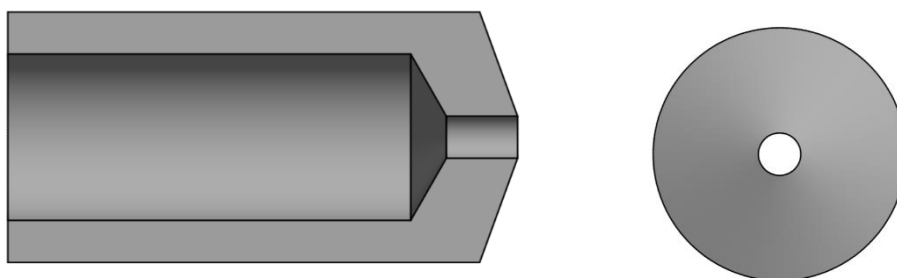
Vzhledem k nesymetrii následujících trysek bylo proudění složitějšího charakteru. V ústí trysky se často objevovaly oblasti podtlaku a na malých rozměrech tak docházelo k velkým změnám proudění. Aby se hodnoty y^+ pohybovaly v rozumných intervalech, bylo potřeba sít u některých trysek pro dané přetlaky upravovat. Uvedené informace o výpočtové síti jsou uváděny vždy pro nejmenší přetlak (10 400 Pa), dále upravované sítě měly srovnatelné charakteristiky.

Jak již bylo v textu uvedeno, je u výpočtu následujících trysek nutné provést v nastavení jisté změny. Ty jsou vypsány v Tab. 9.

Tab. 9 Změny v nastavení výpočtu.

Nastavení výpočtu	
Vzduch	Ideal gas
Hydraulický průměr [mm]	18,6
Tlak za operačních podmínek [Pa]	99 600
Timescale Factor	0,5

3.1 Tryska 1



Obr. 20 Geometrie trysky 1

Tab. 10 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 1.

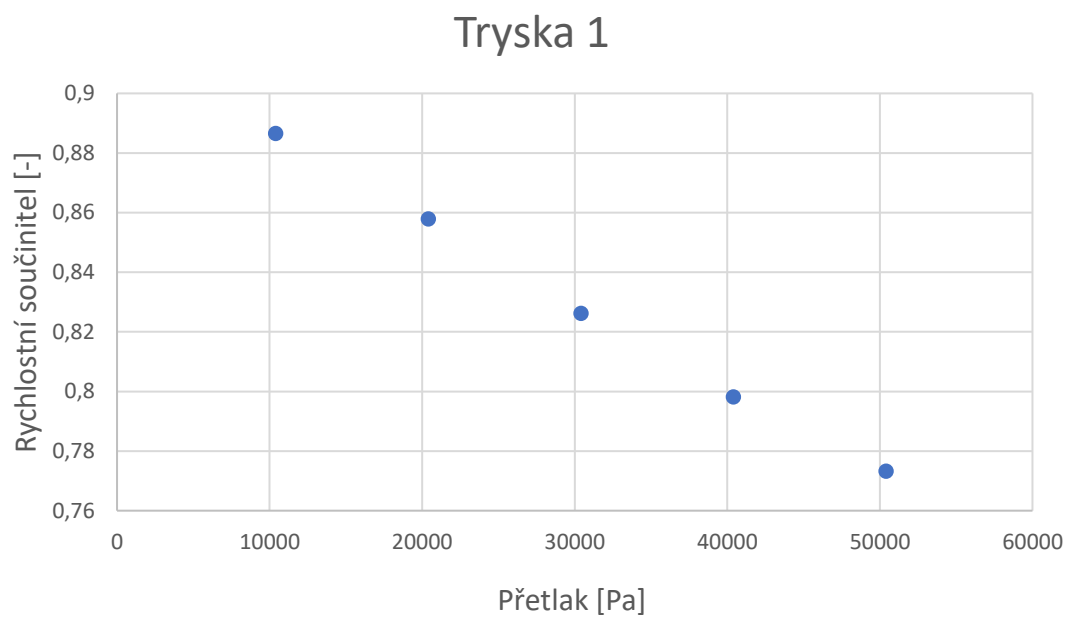
Počet otvorů	Umístění otvoru	Průměr otvoru [mm]	Kuželovitost povrchu trysky [°]	Kuželovitost vnitřku trysky [°]
1	v ose trysky	4,7	140	120

Informace o výpočtové síti	
Stěnová funkce	Enhanced Wall Treatment
Průměrná kvalita elementů	0,58
Průměrná šikmost	0,0045
Průměrná hodnota ortogonalita	0,99
Počet elementů	341 206

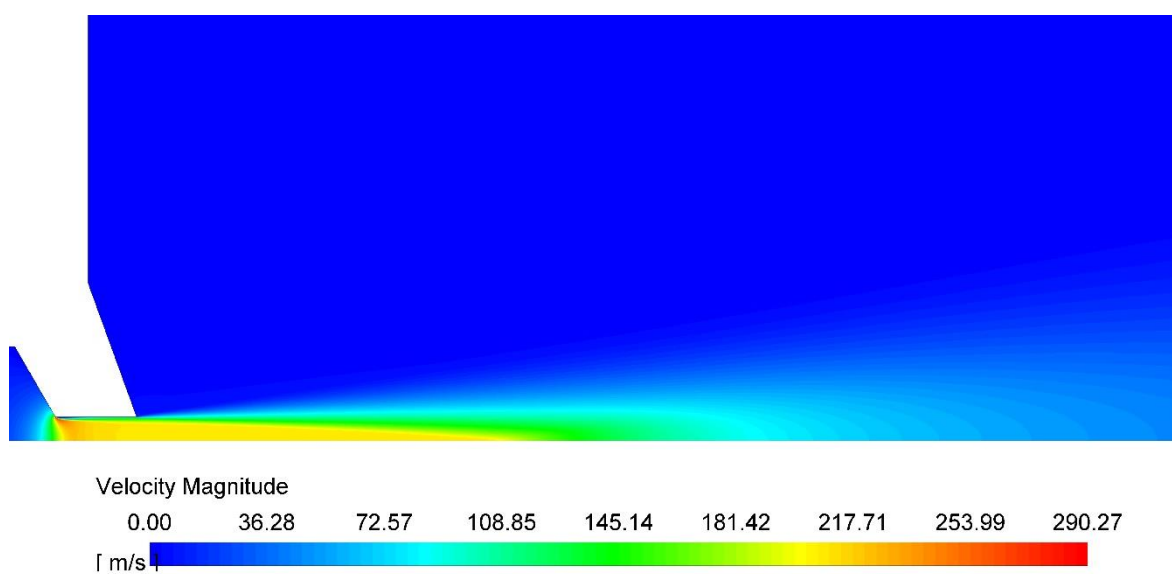
Tab. 11 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 1.

Přetlak [Pa]	w [m/s]	w' [m/s]	w_{CFD} [m/s]	φ [-]	Rozdíl oproti experimentu [%]
10 400	132,6	117,2	117,6	0,89	0,34
20 400	188,6	168,5	161,7	0,86	4,03
30 400	233,3	201,3	192,8	0,83	4,22
40 400	272,3	230,7	217,4	0,80	5,76
50 400	307,6	252,9	237,9	0,77	5,93

Kde w [m/s] je teoretická výstupní rychlost,
 w' [m/s] experimentálně změřená rychlost,
 w_{CFD} [m/s] vypočtená rychlost pomocí CFD,
 φ [-] je rychlostní součinitel.

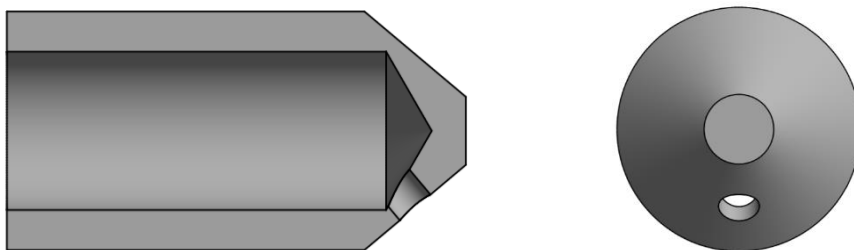


Obr. 21 Závislost rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 1



Obr. 22 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa, tryska 1

3.2 Tryska 2



Obr. 23 Geometrie trysky 2

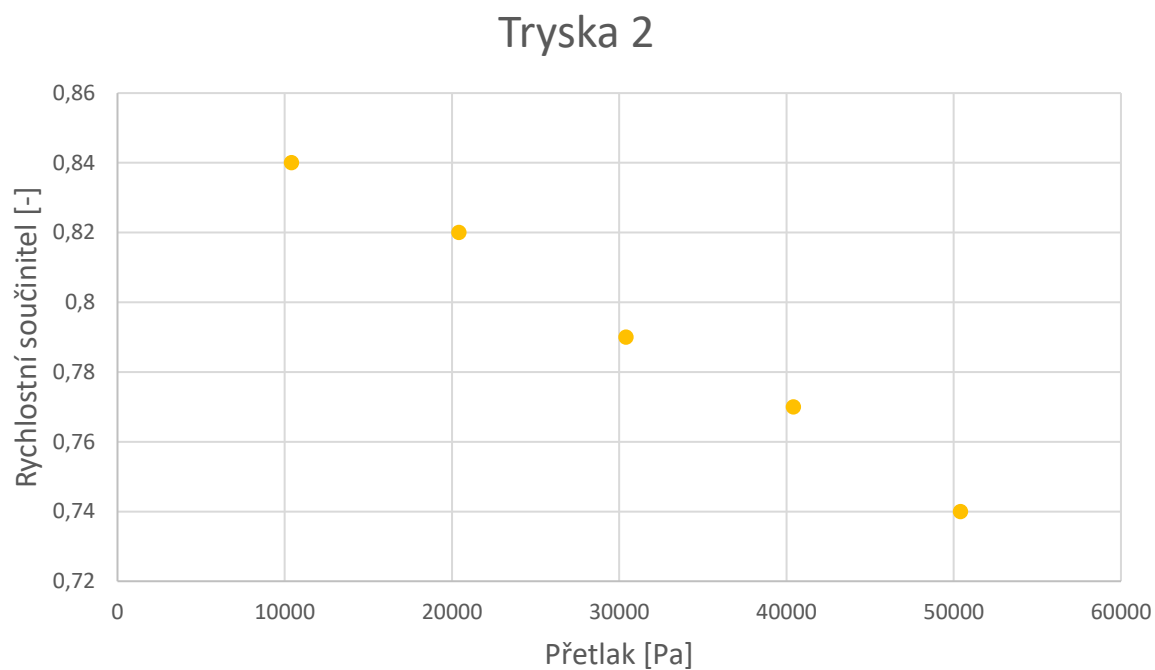
Tab. 12 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 2.

Počet otvorů	Umístění otvoru	Průměr otvoru [mm]	Kuželovitost povrchu trysky [°]	Kuželovitost vnitřku trysky [°]
1	na straně	4,7	80	120

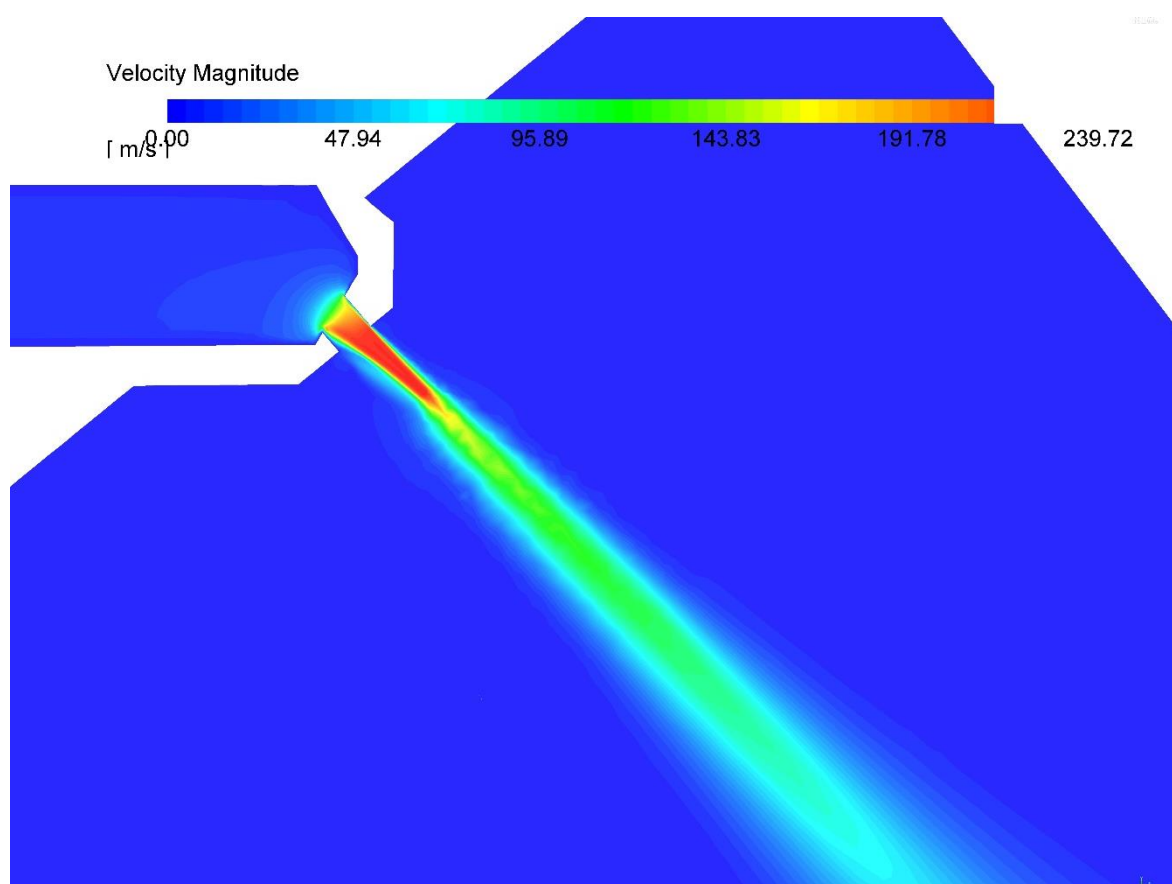
Informace o výpočtové síti	
Stěnová funkce	Scalable Wall Function
Průměrná kvalita elementů	0,78
Průměrná šikmost	0,19
Průměrná hodnota ortogonality	0,84
Počet elementů	511 198

Tab. 13 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 2.

Přetlak [Pa]	w [m/s]	w' [m/s]	w_{CFD} [m/s]	φ [-]	Rozdíl oproti experimentu [%]
10 400	132,6	112,5	111,36	0,84	1,01
20 400	188,6	162,2	153,86	0,82	5,14
30 400	233,3	199,3	184,37	0,79	7,49
40 400	272,3	226,4	208,50	0,77	7,91
50 400	307,6	250,3	228,80	0,74	8,59

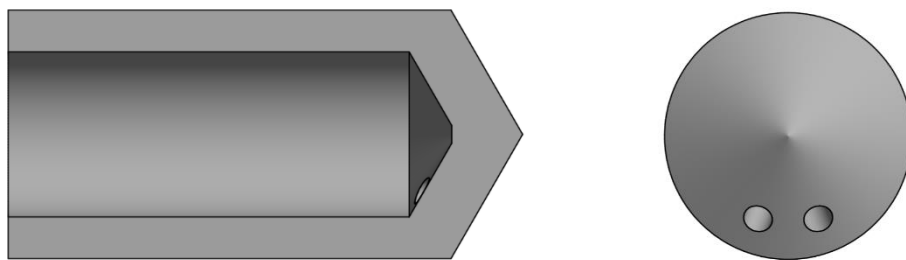


Obr. 24 Závislost rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 2



Obr. 25 Profil rychlosti pro přetlak 40 400 Pa, tryska 2

3.3 Tryska 3



Obr. 26 Geometrie trysky 3

Tab. 14 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 3.

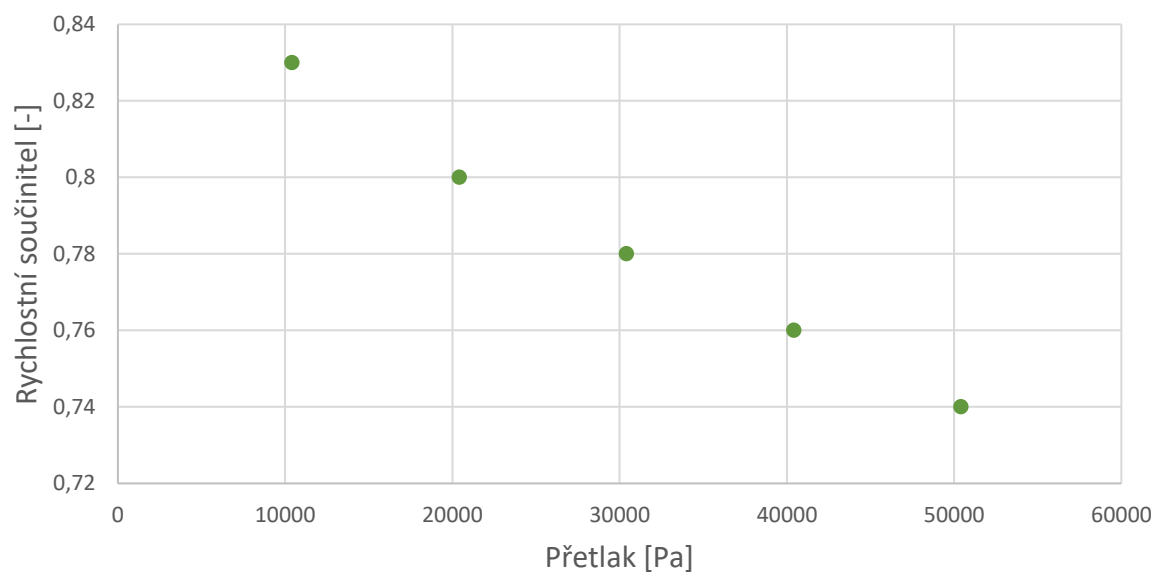
Počet otvorů	Umístění otvoru	Průměr otvoru [mm]	Kuželovitost povrchu trysky [°]	Kuželovitost vnitřku trysky [°]
2	na straně	3,3	120	120

Informace o výpočtové síti	
Stěnová funkce	Scalable Wall Function
Průměrná kvalita elementů	0,78
Průměrná šikmost	0,21
Průměrná hodnota ortogonalita	0,82
Počet elementů	473 880

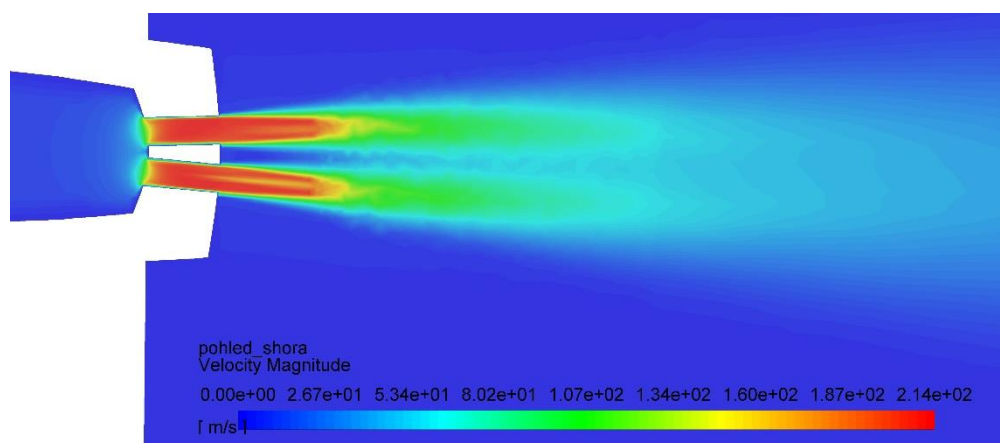
Tab. 15 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 3.

Přetlak [Pa]	w [m/s]	w' [m/s]	w_{CFD} [m/s]	ϕ [-]	Rozdíl oproti experimentu [%]
10 400	132,6	106,4	109,6	0,83	3,01
20 400	188,6	154,0	151,0	0,80	1,95
30 400	233,3	195,3	182,5	0,78	6,55
40 400	272,3	230,2	206,6	0,76	10,29
50 400	307,6	254,6	226,4	0,74	11,09

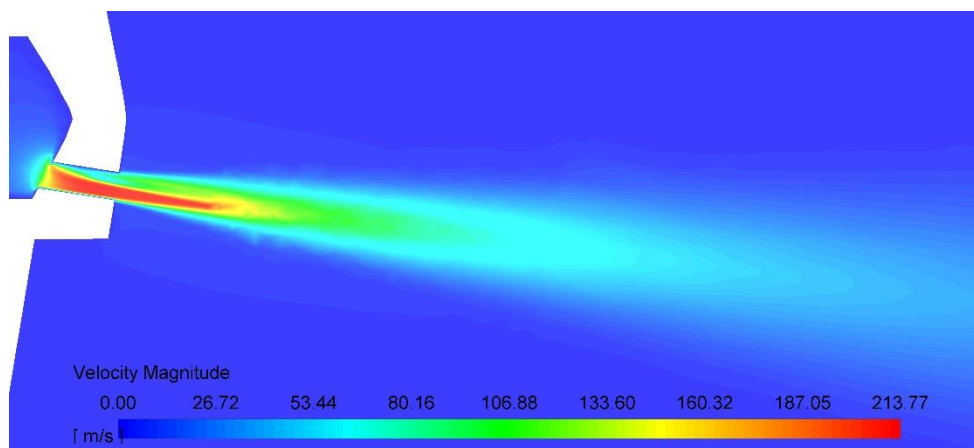
Tryska 3



Obr. 27 Graf závislosti rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 3

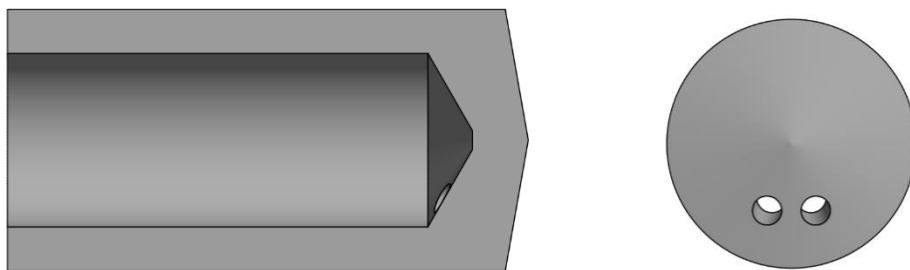


Obr. 28 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa , pohled shora, tryska 3



Obr. 29 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa, boční pohled, tryska 3

3.4 Tryska 4



Obr. 30 Geometrie trysky 4

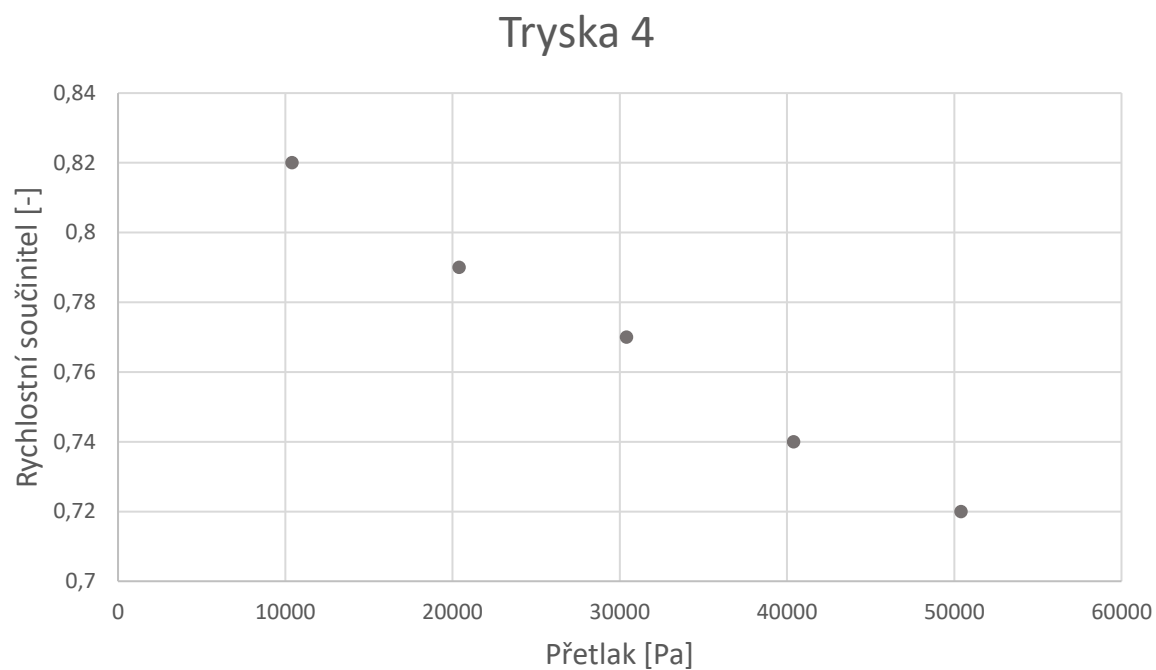
Tab. 16 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 4.

Počet otvorů	Umístění otvoru	Průměr otvoru [mm]	Kuželovitost povrchu trysky [°]	Kuželovitost vnitřku trysky [°]
2	na straně	3,3	160	120

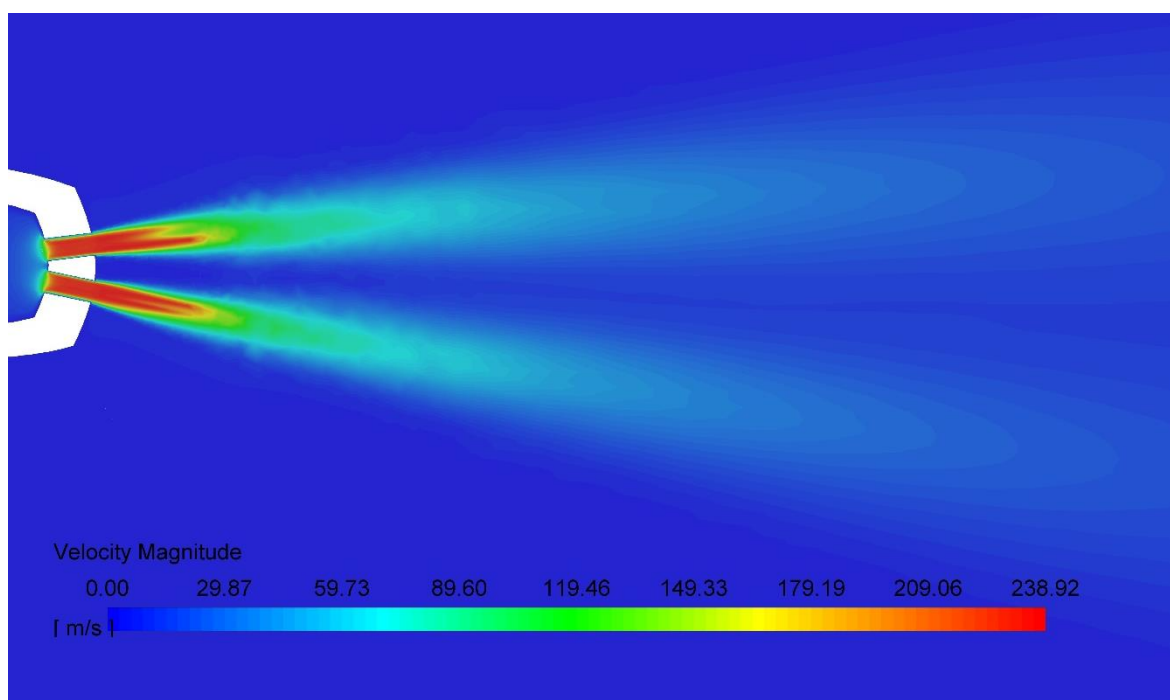
Informace o výpočtové síti	
Stěnová funkce	Scalable Wall Function
Průměrná kvalita elementů	0,75
Průměrná šikmost	0,22
Průměrná hodnota ortogonalita	0,80
Počet elementů	464 301

Tab. 17 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 4.

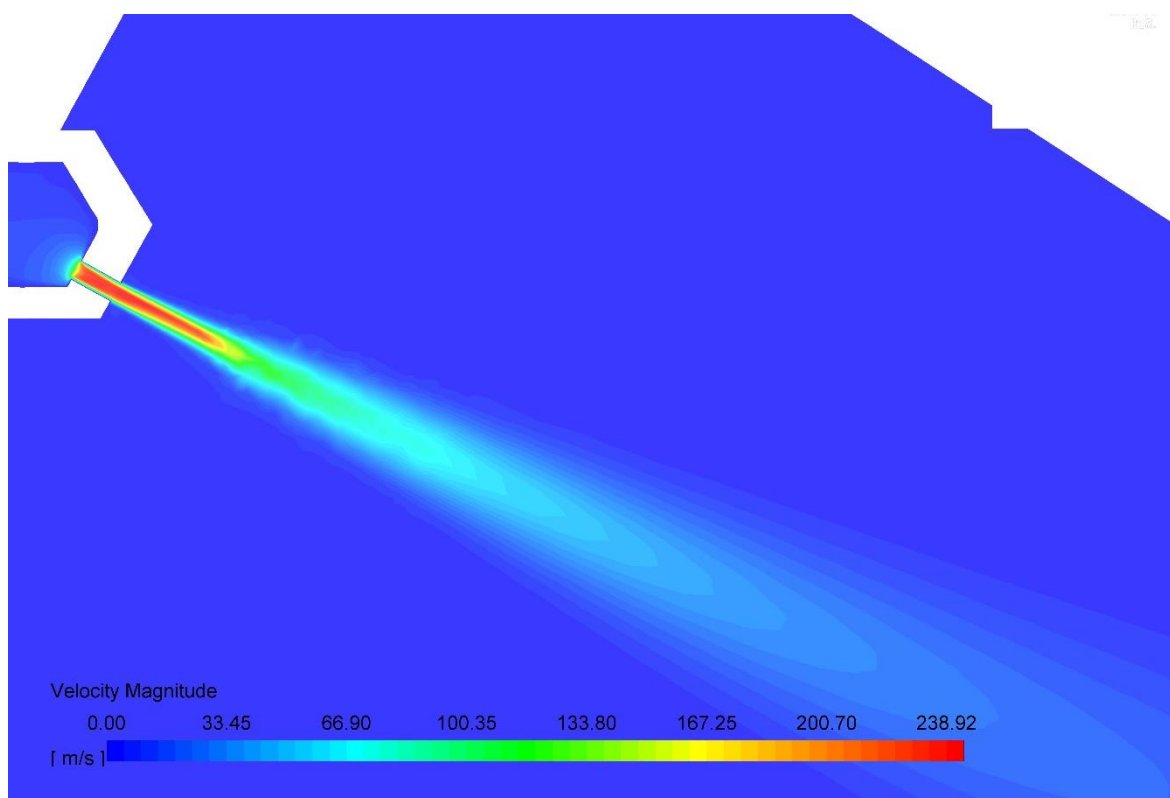
Přetlak [Pa]	w [m/s]	w' [m/s]	w_{CFD} [m/s]	φ [-]	Rozdíl oproti experimentu [%]
10 400	132,6	127,1	108,60	0,82	14,56
20 400	188,6	181,7	149,35	0,79	17,80
30 400	233,3	216,0	178,78	0,77	17,23
40 400	272,3	246,5	202,24	0,74	17,96
50 400	307,6	270,7	221,96	0,72	18,01



Obr. 31 Závislost rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 4

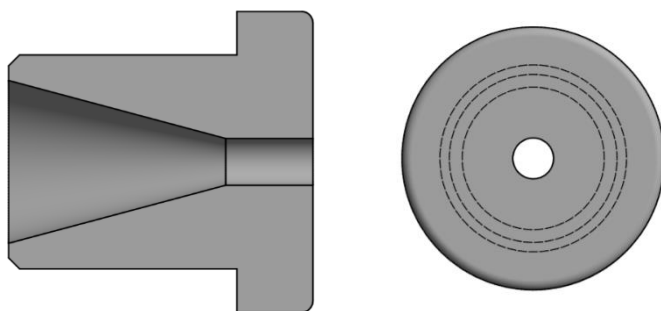


Obr. 32 Profil rychlosti pro přetlak 40 400 Pa, pohled shora, tryska 4



Obr. 33 Profil rychlosti pro $p_{\text{řetlak}} 40\,400\text{ Pa}$, boční pohled, tryska 4

3.5 Tryska 5



Obr. 34 Geometrie trysky 5

Jedná se o trysku, která již v [14] nebyla experimentálně proměřena, nelze tedy určit přesnost výpočtu porovnáním s naměřenými hodnotami. Vzhledem k podobnosti geometrie jak s první, tak modelovou tryskou lze očekávat, že vypočtené hodnoty budou zatížené chybami srovnatelnými s tryskou 1.

Pro srovnání je uveden výpočet za stejných podmínek jako u ostatních trysek, tedy pro daných pět tlakových podmínek před tryskou a se vzduchem jako proudícím médiem.

Pro využitelnost výsledků v praxi je však tato tryska simulována i pro metan a pro tlakové podmínky až do stavu zahlcení.

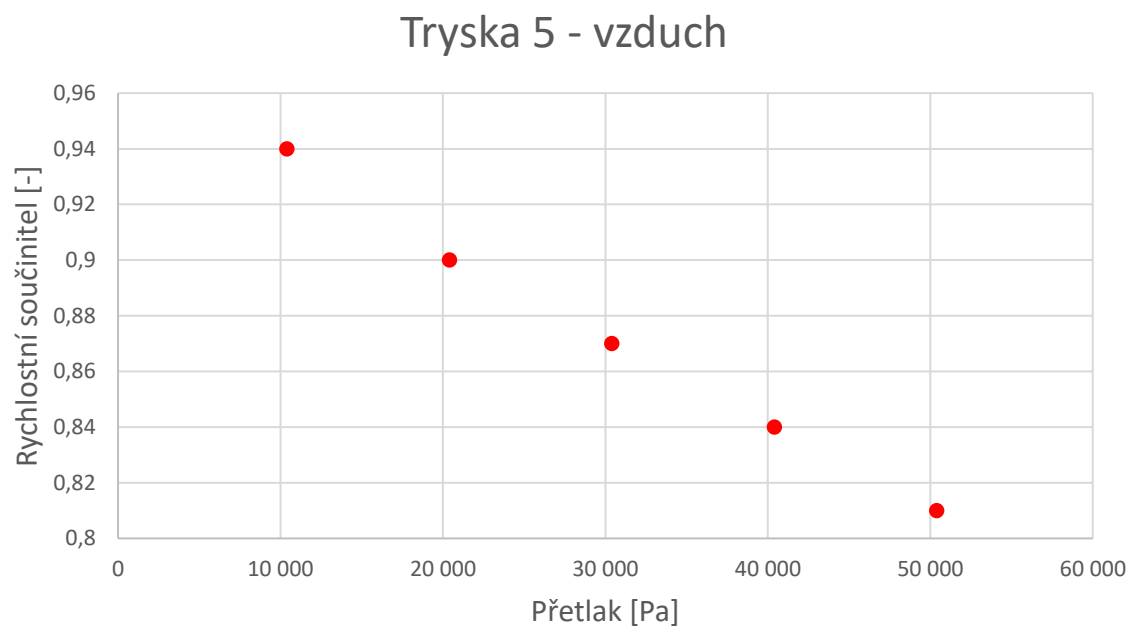
Tab. 18 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 5.

Počet otvorů	Umístění otvoru	Průměr otvoru [mm]	Kuželovitost povrchu trysky [°]	Kuželovitost vnitřku trysky [°]
1	v ose trysky	4,3	180	30

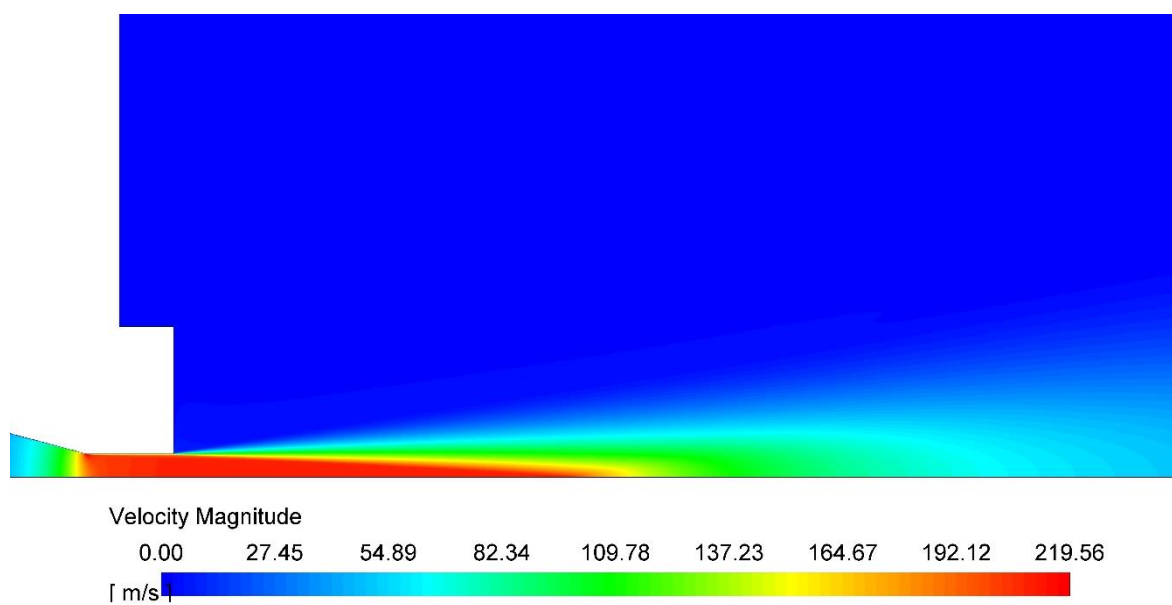
Informace o výpočtové síti	
Stěnová funkce	Enhanced Wall Treatment
Průměrná kvalita elementů	0,57
Průměrná šikmost	0,0029
Průměrná hodnota ortogonality	0,9995
Počet elementů	379 730

Tab. 19 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 5, médium vzduch.

Přetlak [Pa]	w [m/s]	w_{CFD} [m/s]	φ [-]
10 400	132,6	124,61	0,94
20 400	188,6	170,24	0,90
30 400	233,3	203,1	0,87
40 400	272,3	228,69	0,84
50 400	307,6	250,1	0,81



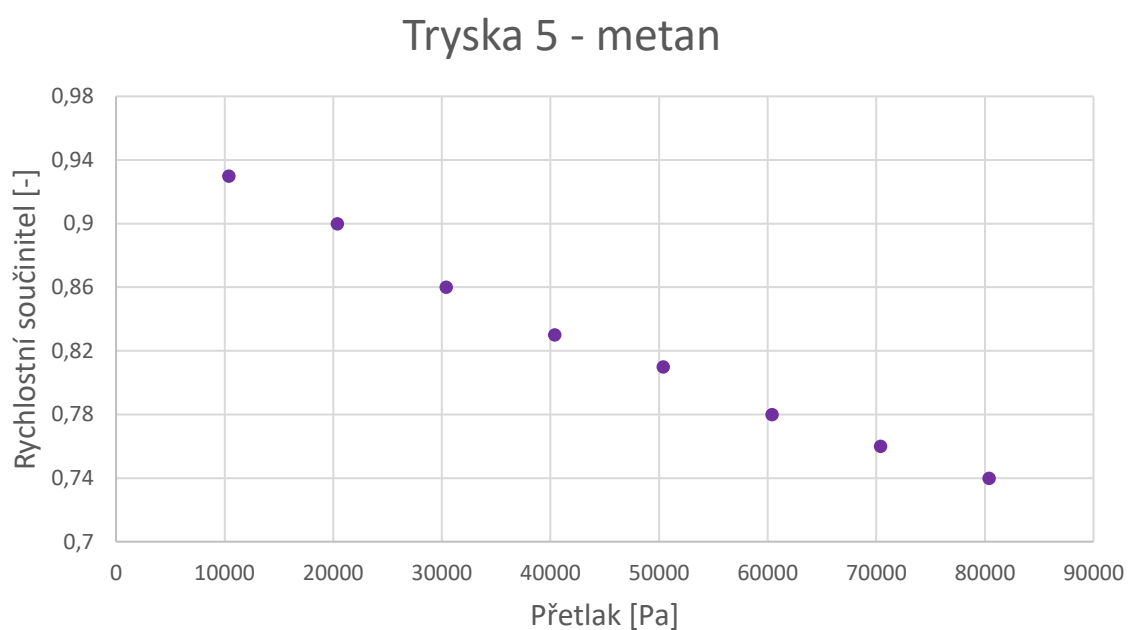
Obr. 35 Závislost rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 5, médium vzduch



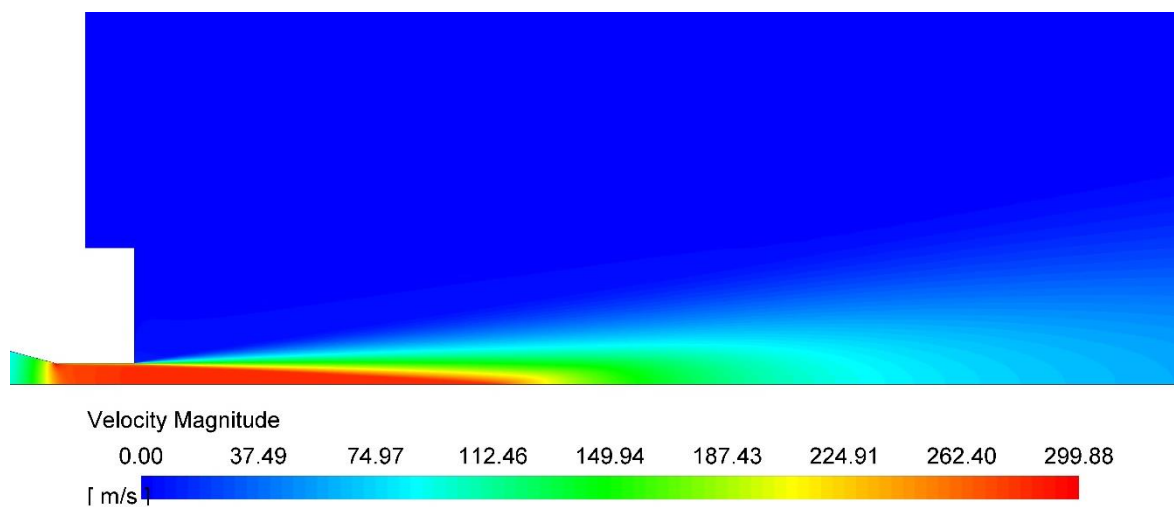
Obr. 36 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa, tryska 5, médium vzduch

Tab. 20 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 5, médium metan.

Přetlak [Pa]	w [m/s]	w_{CFD} [m/s]	φ [-]
10 400	179,83	167,9	0,93
20 400	255,98	229,75	0,90
30 400	317,09	273,95	0,86
40 400	370,45	309,13	0,83
50 400	418,85	338,32	0,81
60 400	463,72	363,24	0,78
70 400	505,89	385,02	0,76
80 400	545,90	404,31	0,74

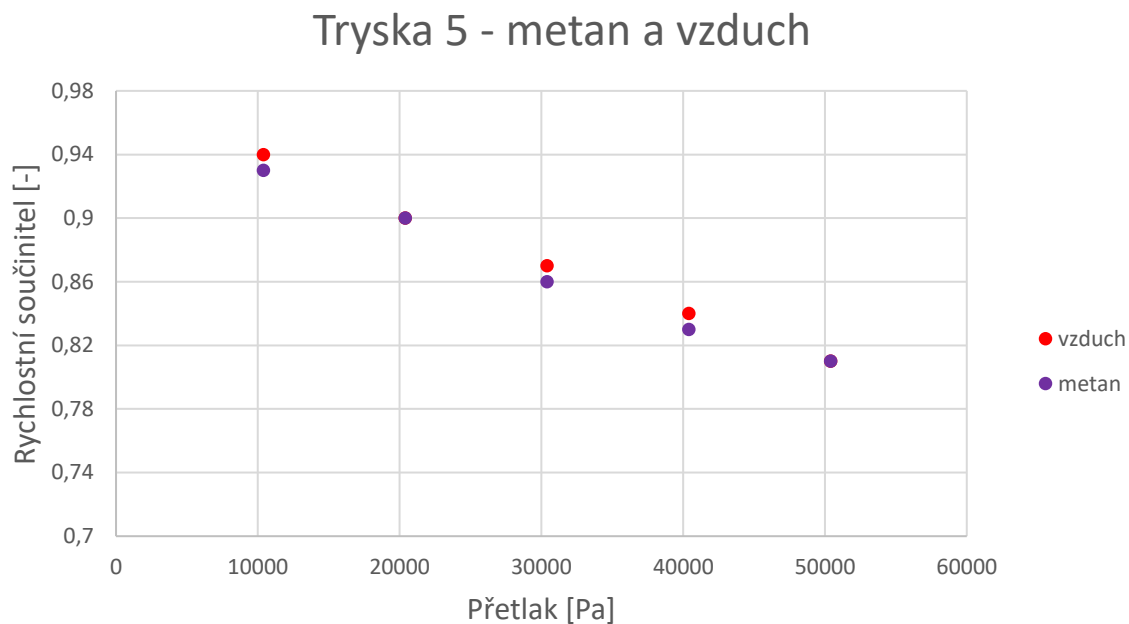


Obr. 37 Graf závislosti rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 5, médium metan



Obr. 38 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa, médium metan

Pro prvních 5 tlakových podmínek jsou v následujícím grafu pro porovnání znázorněny rychlostní součinitele trysky 5 s oběma médii (vzduchem i metanem).

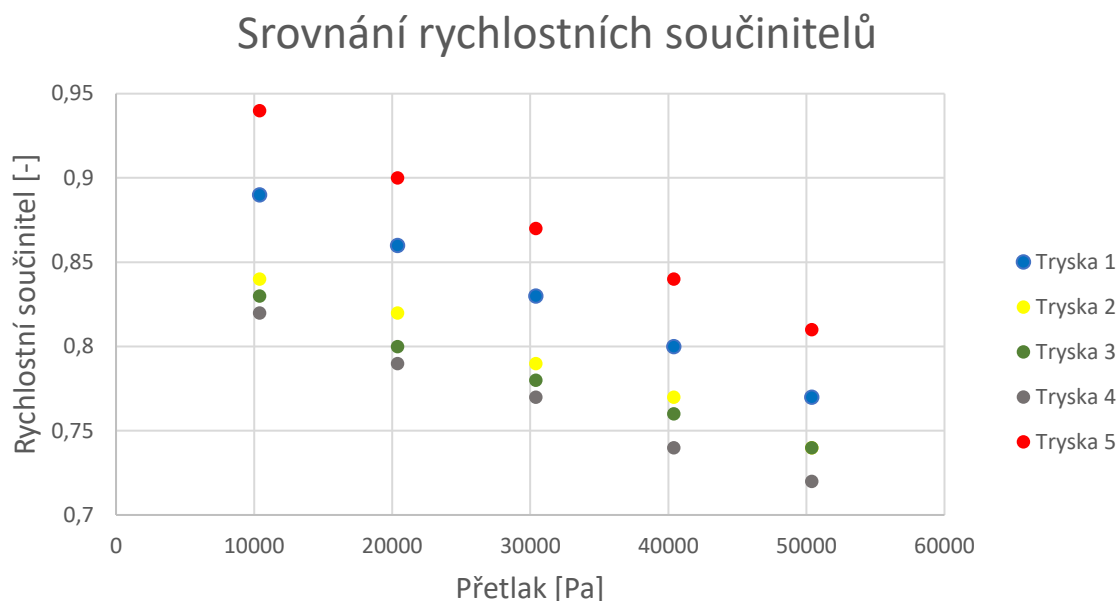


Obr. 39 Srovnání rychlostních součinitelů trysky 5, médium vzduch i metan

Z výsledků simulací trysky 5 je patrné, že rychlostní součinitele pro metan a vzduch se od sebe liší velmi málo. Z praktického hlediska je tedy možné považovat výsledky simulací trysek se vzduchem za použitelné i pro metan.

3.6 Srovnání rychlostních součinitelů

V následujícím grafu jsou vykresleny rychlostní součinitele pro všechny simulované trysky.



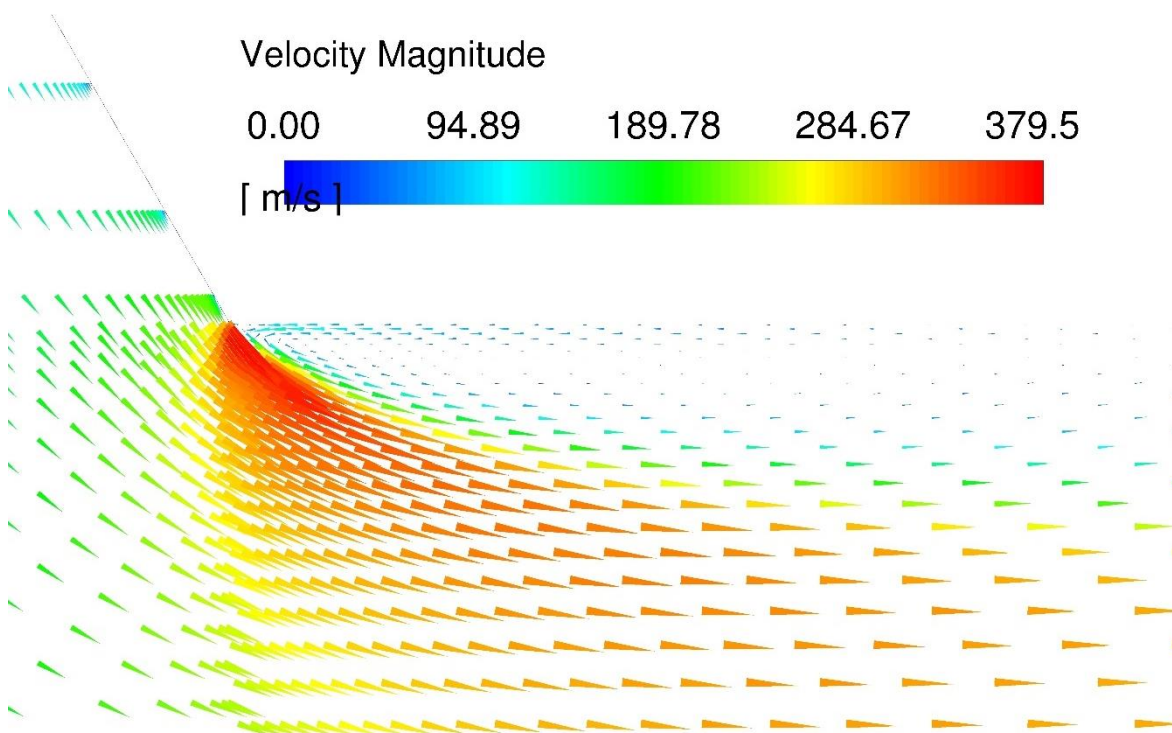
Obr. 40 Srovnání rychlostních součinitelů všech trysek

Z grafu je patrné, že nejúčinněji tlakovou energii na kinetickou zpracovávají tryska 1 a tryska 5, tedy ty, které se vyznačují rotační symetrií. Rychlostní součinitel je u trysky 5 znatelně vyšší, což potvrzuje fakt, že menších ztrát je dosaženo pozvolným zužováním trysky bez ostrých hran a přechodů. Naopak nejmenší rychlostní součinitel vychází u trysky 4. U všech trysek rychlostní součinitel s rostoucím přetlakem, a tedy tlakovým spádem, klesá.

4 Diskuze

Z výsledků simulací je patrné, že průměrná relativní chyba vůči experimentálnímu měření se různí v závislosti na přetlaku a typu trysky. Chyba se s rostoucím přetlakem, a tedy s rostoucí výstupní rychlostí, zvětšuje. Ačkoli lze konstatovat, že u všech trysek bylo dosaženo přesnějšího souladu s naměřenými hodnotami, než tomu bylo v dřívější práci [14], vzhledem k faktu, že nejsou známy nejistoty měření, nelze jednoznačně stanovit významnost odchylek výsledků numerického modelu od naměřených hodnot. U rotačně symetrické trysky 1 je minimální chyba pod 0,5 %, maximální chyba necelých 6 %. U ostatních trysek relativní chyba dosahuje vyšších hodnot. Konkrétně u trysek 2 a 3 variuje mezi 1 a 12 %, u trysky 4 se pohybuje v rozmezí 14 až 18 %.

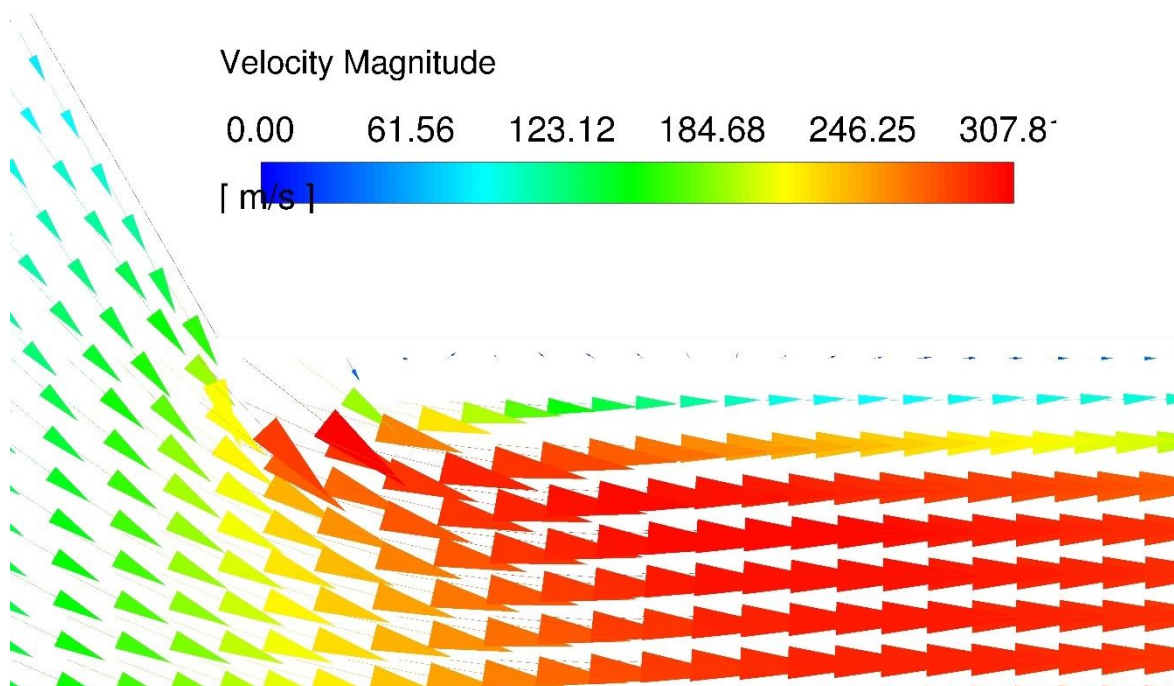
Na následujících obrázcích (Obr. 41 a Obr. 42) jsou vykresleny vektory rychlostí pro trysku 1 v místě ostrého přechodu do ústí trysky. Za účelem porovnání byla tato tryska mimo EWT počítána i metodou SWF. Přetlak na vstupu do trysky je 50 400 Pa.



Obr. 41 Vektory rychlostí pro trysku 1, EWT, detail ostrého přechodu

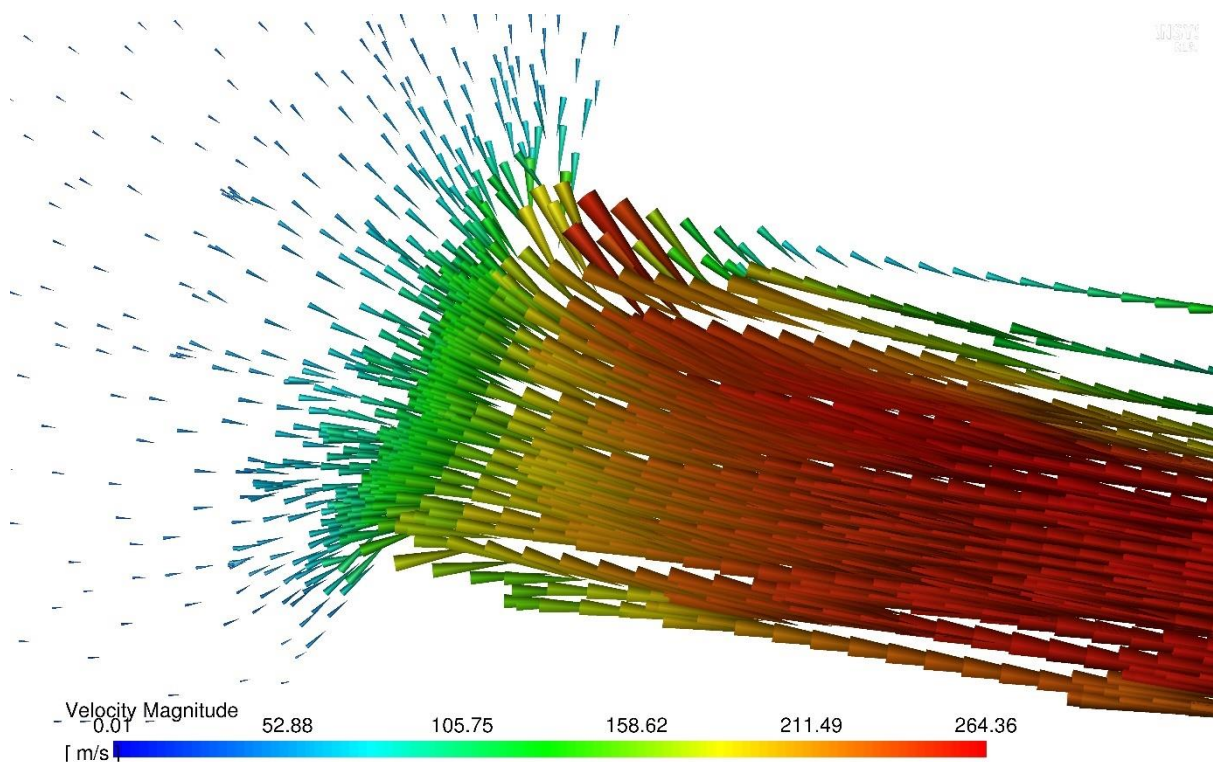
Vektory rychlostí na Obr. 41 velmi dobře vizualizují vznik výrazných zavíření a úplavů za ostrým přechodem. Tyto jevy signalizují nestabilitu proudění a odtrhávání mezí vrstvy, přičemž dochází k disipaci energie ve formě zvýšených tlakových ztrát [15]. Současné nastavení a výběr modelů samozřejmě neumožňuje tyto jevy simulovat, jedná se tedy pouze o indikaci míst, která by měla být v souladu s teorií a experimentálními výsledky.

Metoda SWF nestabilní oblast za přechodem nerozlišuje tak jasně jako EWT, přesto jsou zavíření na vektorech rychlostí patrná, o čemž se lze přesvědčit na Obr. 42.

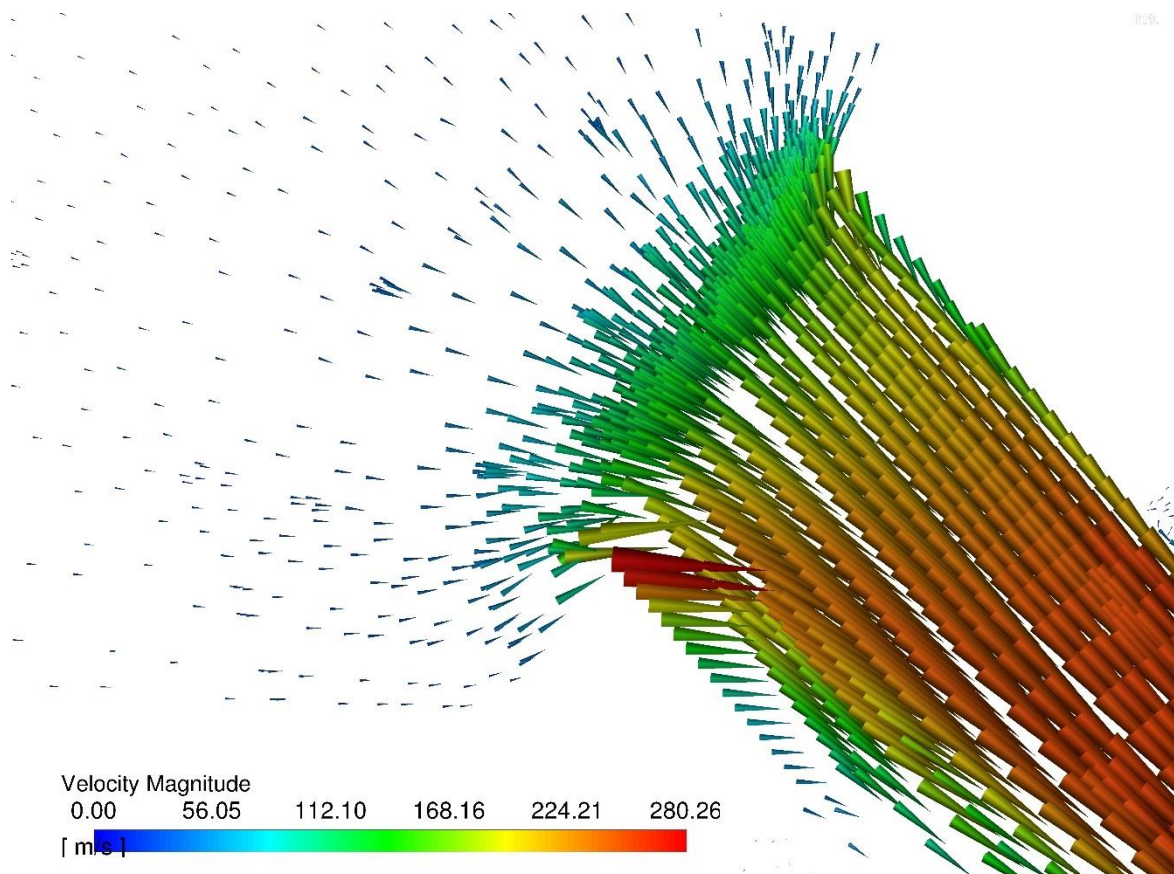


Obr. 42 Vektory rychlostí pro trysku 1, SWF, oblast ostrého přechodu

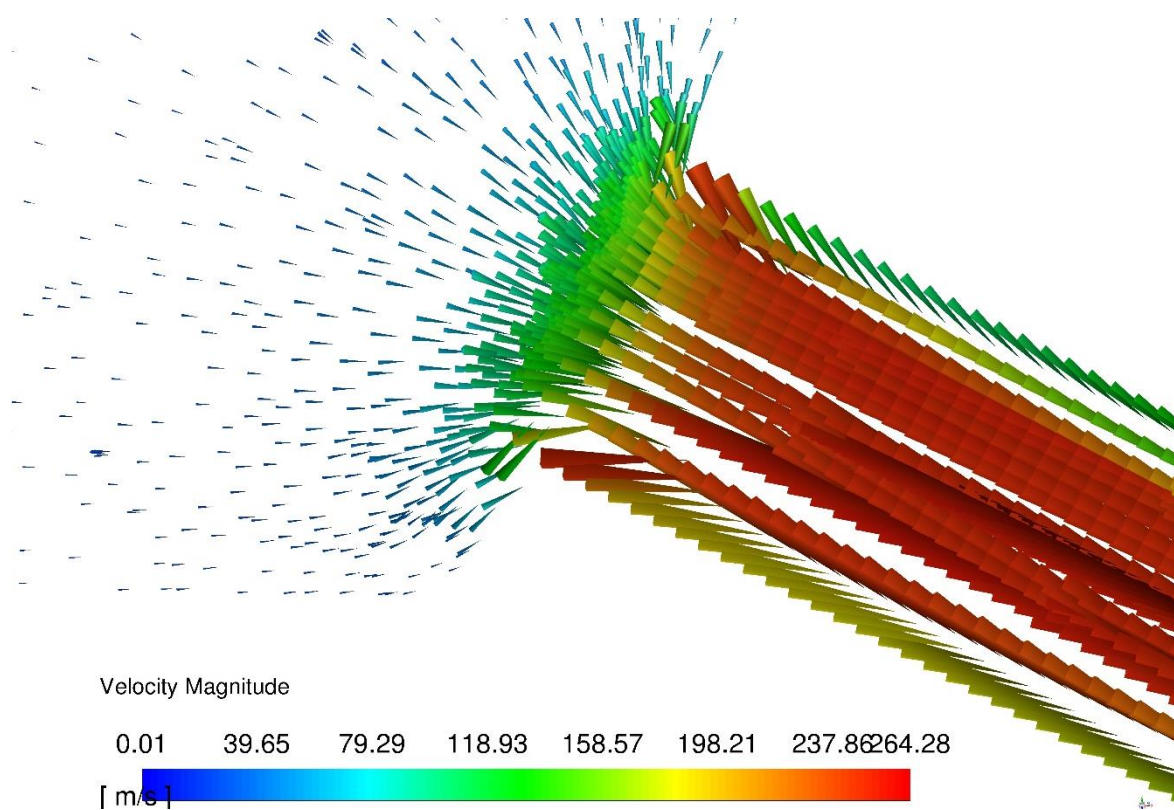
Stejné tvrzení ovšem nelze konstatovat o zbylých tryskách (2, 3, 4). Tyto se vyznačují nesymetrickou geometrií, lze tedy předpokládat, že proudění v nich má složitější charakter. Na Obr. 43 až Obr. 45 jsou opět vykresleny vektory rychlostí v oblasti ústí trysek.



Obr. 43 Vektory rychlostí pro trysku 3



Obr. 44 Vektory rychlostí pro trysku 2



Obr. 45 Vektory rychlostí pro trysku 4

Ani na jednom z posledních tří obrázků, tedy z vektorů rychlostí pro trysky, které byly počítány jako prostorové modely, nejsou zmiňované oblasti nestabilit patrné, přestože geometrie i těchto trysek se vyznačují ostrými přechody a hranami, za nimiž by k úplavům a zavíráním docházet mělo.

Tento fakt lze pravděpodobně přisuzovat nedostatečně jemné síti, která by charakter proudění v nestabilních oblastech byla schopna postihnout. Prostorové modely ovšem, jak již bylo zmíněno, musely být počítány metodou SWF, která svou podstatou hrubou síť vyžaduje.

Výše uvedené je možným a pravděpodobným důvodem rostoucí chyby vůči experimentu. Lze usuzovat, že lepších výsledků by bylo dosaženo použitím metody EWT. Ta je ovšem náročná na počet buněk i pro rovinné úlohy, u prostorových je horní hranice elementů pro studentskou verzi programu Ansys Fluent při použití této metody několikanásobně překročena.

Závěr

Cílem této závěrečné práce bylo seznámit se s počítačovým modelováním proudění pomocí studentské verze programu Ansys Fluent a určit rychlostní součinitele zadaných trysek.

V první fázi byl výpočet laděn na referenční geometrii, již byla proměřená tryska s rychlostním součinitelem $\varphi = 0,92$, uvedená v publikaci Josefa Fíka [7]. Na rovinném modelu byly testovány dvě základní metody pro výpočet proudění v oblasti mezní vrstvy – Enhanced Wall Treatment a Scalable Wall Function. Vzhledem k téměř stejným výsledkům obou metod bylo pro prostorové modely využito možnosti modelovat proudění pomocí škálovatelných stěnových funkcí, čímž se velmi snížil počet použitých buněk a bylo tak dodrženo hranice počtu elementů pro studentskou verzi Ansys Fluent. Správnost této volby byla dále ověřena a potvrzena srovnáním výsledků rovinného modelu počítaného náročnější metodou EWT a prostorového modelu metodou SWF. Vypočtené rychlostní součinitele okolo uvedené hodnoty 0,92 variovaly v závislosti na přetlaku. Vzhledem k faktu, že nebyly známy podmínky, za nichž byla tryska proměřena (především tlakový spád), nelze jednoznačně stanovit odchylky výsledků numerického modelu od tabelované hodnoty.

Dále bylo simulováno proudění v pěti zadaných tryskách. Čtyři z nich byly proměřeny v rámci závěrečné práce Lucie Ledererové [14].

Vypočtené výstupní rychlosti rotačně symetrické trysky 1 se od experimentu odlišovaly minimálně o 0,34 % a maximálně o necelých 6 %. Tryska 5 nebyla experimentálně proměřena. Výpočet byl zjednodušen na rovinný problém a byl řešen metodou EWT. Vzhledem k podobnosti geometrie jak s modelovou, tak první tryskou lze předpokládat, že vypočtené výstupní rychlosti budou zatíženy chybami srovnatelnými s tryskou 1. Pro možnost dalšího praktického využití byla tryska 5 simulována ještě s metanem jako médiem, pro několik tlakových podmínek až do stavu zahlcení trysky. Rychlostní součinitel opět s rostoucím přetlakem klesal. Porovnáním výsledků simulací se vzduchem i metanem u této trysky bylo zjištěno, že rozdíly v rychlostních součinitelích jsou malé. Lze tedy předpokládat, že rychlostní součinitele trysek, počítaných se vzduchem, je možné použít i pro metan.

Trysky 2, 3 a 4 bylo, vzhledem k jejich nesymetrické geometrii, potřeba simulovat ve 3D. S ohledem na maximální povolený počet buněk pro studentskou verzi bylo nutno tyto trysky počítat metodou SWF. U prvních dvou zmíněných chyba variovala mezi 1 a 12 %, u trysky 4 dosahovala až 18 %. Ačkoli lze konstatovat, že u všech trysek bylo dosaženo lepšího souladu s naměřenými hodnotami, než tomu bylo v práci [14], vzhledem k faktu, že nejsou známy nejistoty měření, nelze jednoznačně stanovit významnost odchylek výsledků numerického modelu od naměřených hodnot. U všech trysek rychlostní součinitel s rostoucím přetlakem klesal. U nesymetrických geometrií je charakter proudění složitější, je tedy pravděpodobné, že vyšší relativní chyba je způsobena tím, že metoda SWF není již schopna dostatečně postihnout chování proudění v blízkosti stěny. Využitím metody EWT by mohlo být dosaženo lepších výsledků, vzhledem k náročnosti této metody na počet buněk by ale bylo potřeba úlohy počítat pomocí plné verze programu Ansys Fluent.

Zajímavou problematikou, která se se studiem plynových trysek váže, je vyhodnocování úhlu rozstříku paliva. Pro simulaci trysek v této práci byla za ústím trysek modelována i dostatečně velká doména, do níž plyn proudí. Je tedy možné vykreslit si profil, s nímž médium z trysky

vytéká. Úhel rozstříku v rámci této práce řešen nebyl (nebyl ani součástí zadání), a to především kvůli nedostatku času, který je pro nastudování této poměrně náročné problematiky a její následnou praktickou aplikaci potřeba. Zmíněné téma by ovšem mohlo sloužit jako námět k jiné závěrečné práci.

Seznam použitých zdrojů

- [1] SAZIMA, Miroslav, Jiří SCHNELLER a Vladimír KMONÍČEK. *Teplota*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Česká matice technická. ISBN 80-030-0043-2.
- [2] KALČÍK, Josef a Karel ŠÝKORA. *Technická termomechanika: učebnice pro vysoké školy*. Praha: Academia, 1973.
- [3] Laminar and turbulent flow. In: *CFD Support* [online]. Praha: CFD Support [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.cfdsupport.com/openfoam-training.html>
- [4] DEJČ, Michail Jefimovič. *Technická dynamika plynů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967. Teoretická knižnice inženýra.
- [5] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. *Transformační technologie* [online]. Brno [cit. 2019-03-25]. ISBN -. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/40.html#menu>
- [7] FÍK, Josef. *Spalování plynných paliv a plynové hořáky*. Praha: GAS, c1998. ISBN 80-861-7601-0.
- [8] Hořáky pro Spalování Zemního Plynů (II). [online]. [Cit. 2019-3-25]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/2170-horaky-pro-spalovanizemniho-plynu-ii>.
- [9] JAHODA, M. Počítačová dynamika tekutin-užitečný nástroj pro inženýry. In: *VŠCHT, Ústav chemického inženýrství* [online]. Praha, 2019 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/bezpecnostni_inzenyrstvi/CFD.shrnuti.pdf
- [10] ANDERSON, John D. *Computational fluid dynamics: the basics with applications*. New York: McGraw-Hill, c1995. ISBN 00-700-1685-2.
- [11] WALOSZEK, J. *Počítačové modelování proudění vzduchu v plynovém hořáku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vondál, Ph.D.
- [12] ANSYS®, Release 19.1 Help System, Fluent Theory Guide. ANSYS, Inc."
- [13] VLČEK, Petr. *Modelování turbulentního proudění*, s. 21. [Online]. Dostupné z: <http://chps.fsfd.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf>. [cit. 2019-04-10]
- [14] LEDEREROVÁ, Lucie. *Charakteristické parametry palivových trysek*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Bělohradský, Ph.D.

- [15] IDELCHIK, I.E. *Handbook of Hydraulic Resistance*. 3rd edition. Moscow: Steinberg, 1992. ISBN 5-217-00393-6.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbols

a	$[m/s]$	Rychlost zvuku
a_t	$[J/kg]$	Měrná technická práce
c_p	$[J/kgK]$	Měrná tep. kapacita za konst. tlaku
c_v	$[J/kgK]$	Měrná tep. kapacita za konst. objemu
d	$[m]$	Hydraulický průměr
D	$[m]$	Průměr ústí trysky
g	$[ms^{-2}]$	Gravitační zrychlení
h	$[m]$	Výška
i	$[J/kg]$	Měrná entalpie
i_0	$[J/kg]$	Klidová měrná entalpie
L	$[m]$	Délka ústí trysky
\dot{m}	$[kg/s]$	Hmotnostní tok
Ma	$[-]$	Machovo číslo
n	$[-]$	Normála povrchu
p	$[Pa]$	Tlak
p_0	$[Pa]$	Klidový tlak
p^*	$[Pa]$	Kritický tlak
q	$[J/kg]$	Měrné teplo
r	$[J/kgK]$	Měrná plynová konstanta
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
s	$[J/kgK]$	Měrná entropie
S	$[m^2]$	Průtočná plocha
T	$[K]$	Teplota
v	$[m/s]$	Rychlost média (str.16)
v	$[m^3/kg]$	Měrný objem
v_0	$[m^3/kg]$	Měrným objem v klidovém stavu
w	$[m/s]$	Teoretická výtoková rychlost
w_{CFD}	$[m/s]$	Výtoková rychlost vypočtená numericky
w_s	$[m/s]$	Střední rychlost proudění
w_0	$[m/s]$	Rychlost proudění v klidovém stavu
w_{2D}	$[m/s]$	Vypočtená výtoková rychlost 2D trysky
w_{3D}	$[m/s]$	Vypočtená výtoková rychlost 3D trysky
w'	$[m/s]$	Naměřená výtoková rychlost
β	$[-]$	Tlakový poměr
β^*	$[-]$	Kritický tlakový poměr
φ	$[-]$	Rychlostní součinitel
φ_{2D}	$[-]$	Rychlostní součinitel 2D modelu

φ_{3D}	$[-]$	Rychlostní součinitel 3D modelu
ρ	$[kg/m^3]$	Hustota
τ	$[Pa]$	Tečné napětí
μ	$[kg/ms]$	Dynamická viskozita
ν	$[m^2/s]$	Kinematická viskozita

Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
EWT	Enhanced Wall Treatment
NO _x	Oxidy dusíku
SWF	Scalable Wall Function

Seznam obrázků

Obr. 1 Profil proudění laminárního (vlevo) a turbulentního (vpravo), převzato z [3], upraveno	17
Obr. 2 Výtok plynu konvergentní tryskou, převzato z [5], upraveno.....	20
Obr. 3 Závislost hmotnostního toku na poměru tlaků, převzato z [5], upraveno	21
Obr. 4 Průběhy rychlostí a tlaků v konvergentní trysce, převzato z [5], upraveno	22
Obr. 5 Tabulka rychlostních součinitelů, převzato z [8]	25
Obr. 6 Modelová tryska, převzato z [8] a upraveno	25
Obr. 7 Geometrie modelové trysky	27
Obr. 8 2D model trysky	28
Obr. 9 3D model trysky	28
Obr. 10 Schéma struktury výpočetní sítě, převzato z [9]	29
Obr. 11 Rozložení mezní vrstvy, převzato z [12], upraveno	30
Obr. 12 Schémata řešení proudění v blízkosti stěn, převzato z [12], upraveno	32
Obr. 13 Detail sítě v oblasti ústí trysky pro metodu stěnových funkcí	33
Obr. 14 Detail sítě v oblasti ústí trysky pro metodu modelování v blízkosti stěny.....	33
Obr. 15 Detail sítě pro prostorový model trysky	34
Obr. 16 Profil rychlosti pro přetlak 1 500 Pa a metodu EWT	37
Obr. 17 Profil rychlosti pro přetlak 1 500 Pa a metodu SWF	37
Obr. 18 Profil tlaku pro přetlak 1 500 Pa	38
Obr. 19 Graf závislosti rychlostního součinitele na přetlaku pro modelovou trysku	40
Obr. 20 Geometrie trysky 1	42
Obr. 21 Závislost rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 1	43
Obr. 22 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa, tryska 1	43
Obr. 23 Geometrie trysky 2	44
Obr. 24 Závislost rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 2.....	45
Obr. 25 Profil rychlosti pro přetlak 40 400 Pa, tryska 2.....	45
Obr. 26 Geometrie trysky 3	46
Obr. 27 Graf závislosti rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 3	47
Obr. 28 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa , pohled shora, tryska 3	47
Obr. 29 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa, boční pohled, tryska 3	47
Obr. 30 Geometrie trysky 4	48
Obr. 31 Závislost rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 4.....	49
Obr. 32 Profil rychlosti pro přetlak 40 400 Pa, pohled shora, tryska 4	49
Obr. 33 Profil rychlosti pro přetlak 40 400 Pa, boční pohled, tryska 4	50
Obr. 34 Geometrie trysky 5	51
Obr. 35 Závislost rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 5, médium vzduch	52
Obr. 36 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa, tryska 5, médium vzduch	52
Obr. 37 Graf závislosti rychlostního součinitele na přetlaku pro trysku 5, médium metan	53
Obr. 38 Profil rychlosti pro přetlak 30 400 Pa, médium metan.....	53
Obr. 39 Srovnání rychlostních součinitelů trysky 5, médium vzduch i metan.....	54
Obr. 40 Srovnání rychlostních součinitelů všech trysek	55
Obr. 41 Vektory rychlostí pro trysku 1, EWT, detail ostrého přechodu	56
Obr. 42 Vektory rychlostí pro trysku 1, SWF, oblast ostrého přechodu	57
Obr. 43 Vektory rychlostí pro trysku 3.....	57
Obr. 44 Vektory rychlostí pro trysku 2.....	58
Obr. 45 Vektory rychlostí pro trysku 4.....	58

Seznam tabulek

Tab. 1 Údaje pro výpočet trysky.	26
Tab. 2 Parametry modelové trysky.	27
Tab. 3 Nastavení výpočtu modelové trysky.	35
Tab. 4 Informace o výpočtové síti.	36
Tab. 5 Hodnoty výstupních rychlostí počítané metodou Enhanced Wall Treatment.	36
Tab. 6 Hodnoty výstupních rychlostí počítané pomocí Scalable Wall Function.	36
Tab. 7 Hodnoty výstupních rychlostí počítané pomocí SWF pro 3D model trysky.	39
Tab. 8 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky.	39
Tab. 9 Změny v nastavení výpočtu.	41
Tab. 10 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 1.	42
Tab. 11 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 1.	42
Tab. 12 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 2.	44
Tab. 13 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 2.	44
Tab. 14 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 3.	46
Tab. 15 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 3.	46
Tab. 16 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 4.	48
Tab. 17 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 4.	48
Tab. 18 Informace o geometrii a výpočtové síti trysky 5.	51
Tab. 19 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 5, médium vzduch.	51
Tab. 20 Přehled vypočtených rychlostí a rychlostních součinitelů trysky 5, médium metan.	53